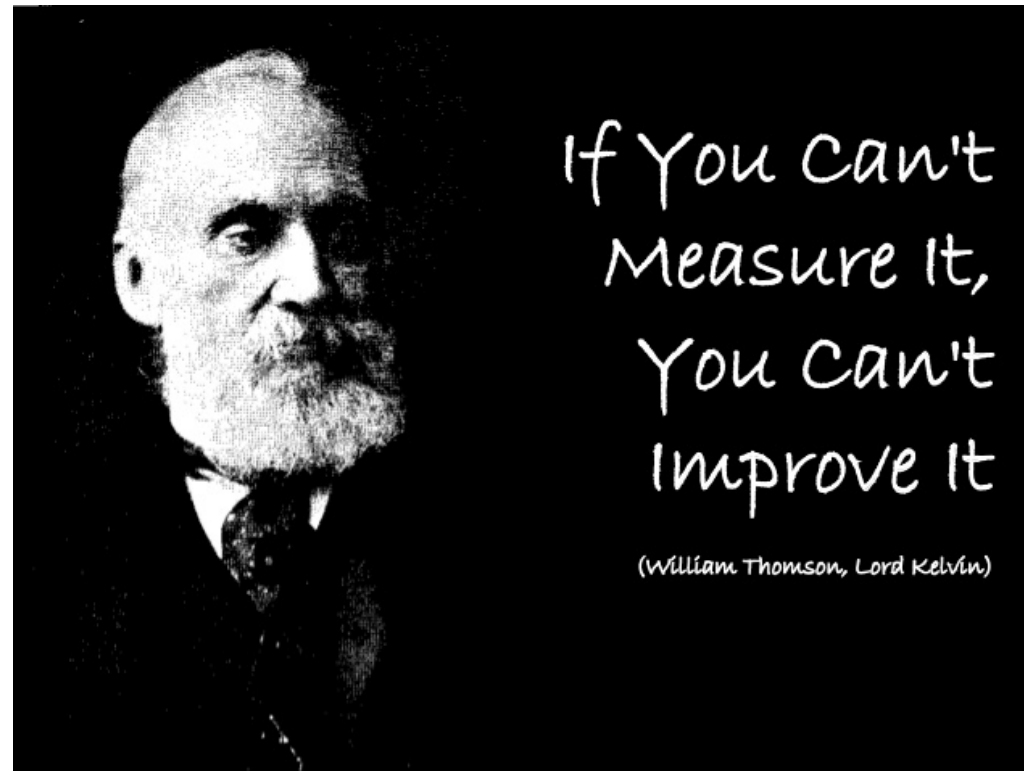


DESIGN DEL PRODOTTO INDUSTRIALE

FISICA TECNICA PER IL DESIGN

AA 2019-20

Termodinamica
- principi
S.02.a



Michele Bottarelli - Dipartimento di Architettura di Ferrara
michele.bottarelli@unife.it

UNITA' DI MISURA

misura = numero + incertezza + unità di misura
(UNI 4546 1984)

Grandezza fondamentale unità di misura	definizione
Lunghezza metro [m]	Il metro è la lunghezza pari a 1650763,73 lunghezze d'onda nel vuoto della radiazione corrispondente alla transizione tra i livelli $2p_{10}$ e $5d_5$ dell'atomo di cripto 86. (11° CGPM, 1960, ris. 6) [1]. il metro corrisponde alla distanza percorsa nel vuoto dalla luce in $1/299792458$ secondi [2].
Massa kilogrammo [kg]	il kilogrammo è l'unità di massa, esso è pari alla massa del prototipo internazionale del kilogrammo (3° CGPM, 1901, pag. 70 del resoconto) [1]. il kilogrammo è la massa uguale a quella del campione primario N.1, cilindro di platino-iridio conservato a Sèvres presso il B.I.P.M. (Bureau Internationale Poids et mesures) [2]
Intervallo di tempo secondo [s]	il secondo è l'intervallo di tempo che corrisponde a 9192631770 cicli della radiazione corrispondente alla transizione tra i due livelli iperfini dello stato fondamentale dell'isotopo 133 del cesio. [1-2]
Intensità di corrente elettrica Ampere [A]	l'Ampere è l'intensità di corrente costante che, se mantenuta in due conduttori paralleli, rettilinei, di lunghezza infinita, di sezione circolare trascurabile e posti alla distanza di un metro l'uno dall'altro nel vuoto, produce tra i conduttori una forza eguale a 2×10^{-7} N per metro di lunghezza (CGPM, 1946, ris. 2 approvata dalla 9° CGPM, 1948).
Intervallo di temperatura Kelvin [K]	il Kelvin, unità di temperatura termodinamica, è la frazione $1/273.16$ della temperatura del punto triplo dell'acqua. (13° CGPM, 1967, ris. 4) [1]
Intensità luminosa Candela [cd]	dopo il XVI CGPM del 1979 la definizione di <i>candela</i> è: l'intensità luminosa, in una data direzione, di una sorgente che emette una radiazione monocromatica di frequenza $540 \cdot 10^{12}$ Hz e la cui intensità energetica in tale direzione è di $1/683$ W/sr [1-2].
Quantità di materia (sostanza?) Mole [mol]	la mole, è la quantità di sostanza di un sistema che contiene tante unità elementari quanti sono gli atomi contenuti in 0.012 kg di carbonio 12. Quando si usa la mole le unità elementari debbono essere specificate, esse possono essere: atomi, molecole, ioni, elettroni o altre particelle oppure raggruppamenti specificati di tali particelle (14° CGPM, 1971, ris. 3) [1]

Fonti:

[1] Allegato al DPR 12.08.82 n. 802

[2] NIST Guide for the Use of the International System of Units (SI) – 1995

multipli e sottomultipli	prefissi	simboli
10^{18}	Exa	E
10^{15}	Peta	P
10^{12}	Tera	T
10^9	Giga *	G
10^6	Mega *	M
10^3	Kilo *	k
10^2	Etto	h
10^1	Deca	da
10^{-1}	Deci	d
10^{-2}	Centi *	c
10^{-3}	Milli *	m
10^{-6}	Micro *	μ
10^{-9}	Nano *	n
10^{-12}	Pico	p
10^{-15}	Femto	f
10^{-18}	Atto	a

UNITA' DI MISURA

Grandezza fisica	unità di misura	simbolo	Equivalenza
Superficie	metro quadrato	m ²	
Volume	metro cubo	m ³	
Frequenza	Hertz	Hz	1/s
Numero d'onde	1 per metro	m ⁻¹	
Velocità	metro per secondo	m/s	
Accelerazione	metro per secondo quadrato	m/ s ²	
Velocità angolare	radiante per secondo	r/s	
Accelerazione angolare	radiante per secondo quadrato	r/ s ²	
Massa volumica	kilogrammo per metro cubo	kg/ m ³	
Forza	Newton	N	kg m / s ²
Pressione	Pascal	Pa	kg /(m s ²)
Viscosità dinamica	Newton secondo per metro quadrato	N s/ m ²	kg /(m s)
Viscosità cinematica	metro quadrato per secondo	m ² /s	
Energia, lavoro	Joule	J	kg m ² / s ²
Potenza	Watt	W	kg m ² / s ³
Entropia	Joule per Kelvin	J/K	kg m ² /(s ² K)
calore specifico	Joule per kilogrammo Kelvin	J/(kg K)	m ² /(s ² K)
Conduttività termica	Watt per metro Kelvin	W/(m K)	kg m/(s ³ K)
carica elettrica	Coulomb	C	
Tensione elettrica	Volt	V	
Campo elettrico	Volt per metro	V/m	
Capacità elettrica	Farad	F	
Permittività	Farad per metro	F/m	
Resistenza elettrica	Ohm	Ω	
Induzione magnetica	Tesla	T	
flusso induzione magnet.	Weber	Wb	
Campo magnetico	Ampere per metro	A/m	
forza magnetomotrice	Ampere	A	
Induttanza	Henry	H	
Permeabilità	Henry per metro	H/m	
flusso luminoso	lumen	lm	
Luminanza	candela per metro quadro	cd/m ²	
Illuminamento	lux	lx	
Intensità energetica	Watt per steradiante	W/sr	

$$1kg_f = 9,80665N$$

$$1Pa = \frac{1N}{1m^2} \cdot \frac{m}{m} = \frac{1J}{1m^3}$$

$$1bar = 10^5 Pa$$

$$1atm = 101325Pa = 101,325kPa$$

$$1J = 1N \cdot 1m$$

$$1kW = \frac{1kJ}{1s}$$

$$1kWh = \frac{1kJ}{1s} \cdot 3600s = 3600kJ$$

APPROCCI TERMODINAMICI

La TERMODINAMICA è la scienza che studia le trasformazioni di un SISTEMA conseguenti a scambi di energia, sotto forma di CALORE e LAVORO.

La TERMODINAMICA CLASSICA adotta un approccio macroscopico

La TERMODINAMICA STATISTICA adotta un approccio microscopico

La termodinamica classica si basa su alcuni *PRINCIPI* indimostrabili e innegabili “*ad oggi*”.

Laddove una macchina negasse ad esempio il principio della conservazione dell'energia, si avrebbe un moto perpetuo di 1^a specie.

UNIVERSO = SISTEMA + AMBIENTE

SISTEMA TERMODINAMICO

E' una regione dello spazio delimitata da una superficie reale o virtuale.

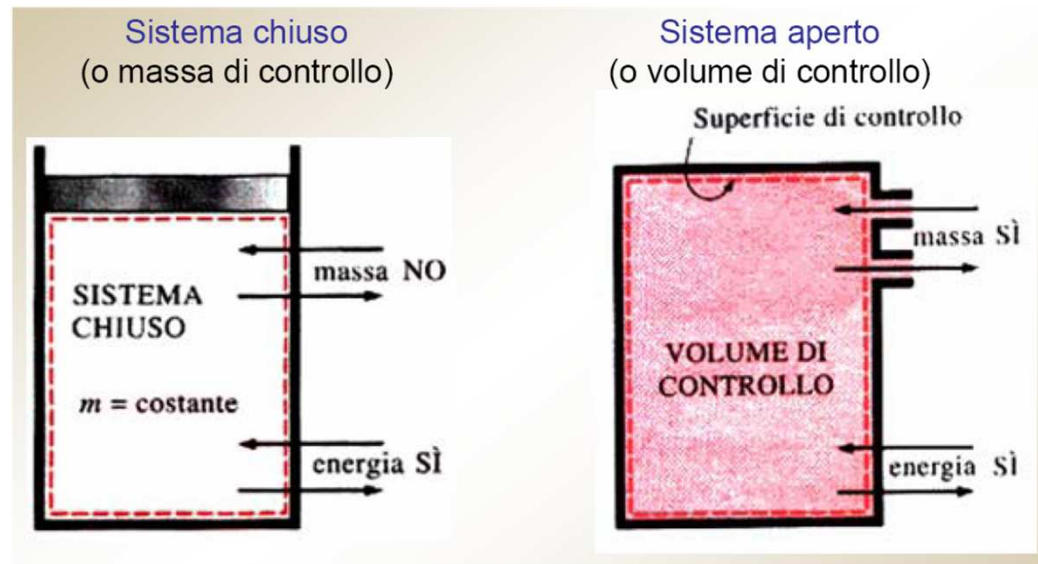
Un sistema si dice:

CHIUSO, se non c'è scambio di materia attraverso il contorno (*sistema a massa di controllo*)

APERTO, se c'è scambio di materia attraverso il contorno (*sistema a volume di controllo*)

ADIABATICO, se non c'è scambio di calore attraverso il contorno

ISOLATO, se non c'è scambio di energia e di massa attraverso il contorno



Un sistema ISOLATO non ha interazioni con l'ambiente

PROPRIETA' DI UN SISTEMA TERMODINAMICO

Sono le grandezze che ne definiscono le caratteristiche in termini fisici, energetici, ...

T - temperatura

p - pressione

V - volume

m - massa

ρ - densità

E_c - energia cinetica

E_p - energia potenziale

U - energia interna

H - entalpia

S - entropia

L - lavoro

Q - quantità di calore

λ - conduttività termica

M - massa molare

...

Proprietà intensive: non dipendono dalla dimensione del sistema (T, p, ...)

Proprietà estensive: dipendono dalla dimensione del sistema (m, E, V, ...)

Proprietà specifiche: sono le proprietà estensive "rese" intensive (E/m, V/m, ρ , ...)

EQUILIBRIO DI UN SISTEMA TERMODINAMICO

Un sistema termodinamico è in equilibrio quando sono verificati tutti gli equilibri:

meccanico

termico

chimico

elettrico

...

Un sistema *semplicemente comprimibile* è univocamente definito attraverso due proprietà intensive indipendenti:

Regola di GIBBS o delle fasi $\rightarrow N = C + 2 - F$

dove:

N = numero di proprietà necessarie alla definizione dello stato termodinamico

C = numero di componenti del sistema (1 = sostanza pura, >1 = miscela)

F = numero delle fasi

Per una sostanza pura (C=1) e omogenea (F=1), lo stato termodinamico è univocamente individuato da due sole proprietà intensive indipendenti (N=2).

Si parla di COORDINATE TERMODINAMICHE

TRASFORMAZIONI DI UN SISTEMA TERMODINAMICO

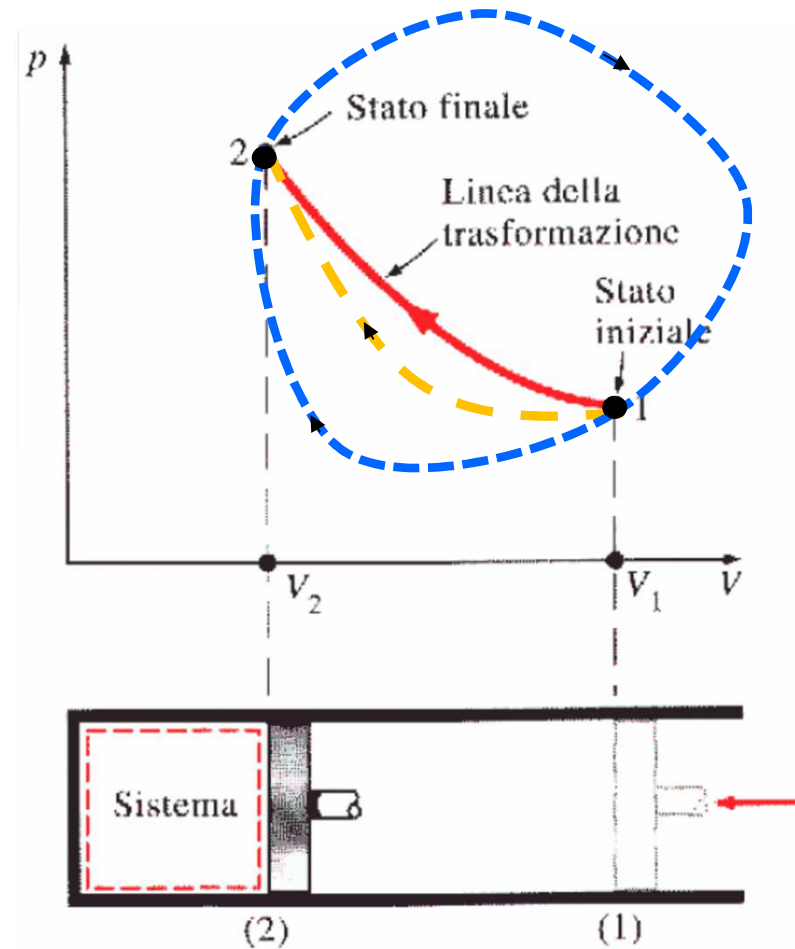
Sono le sequenze di stati termodinamici assunti da un sistema, per passare da uno stato iniziale ad uno finale.

Le trasformazioni possono essere:

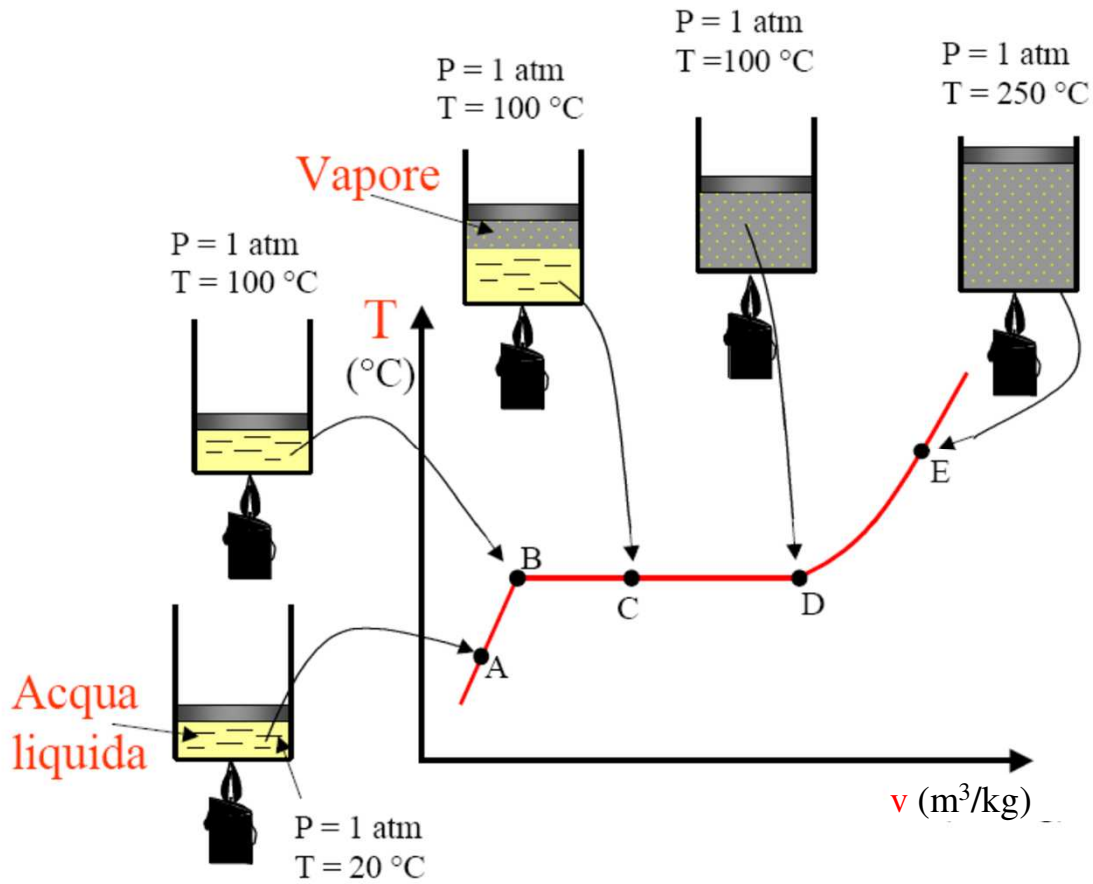
- reversibili
- irreversibili
- cicliche

Alcune sono di riferimento:

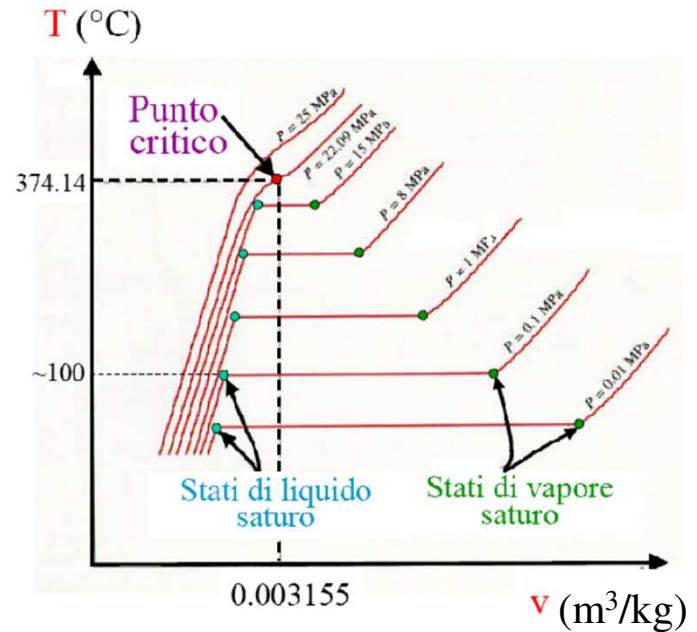
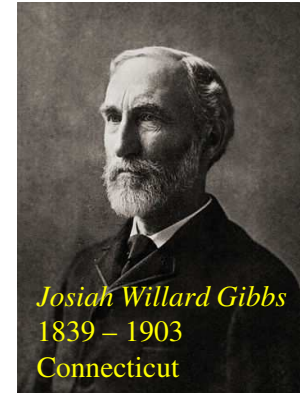
- isobara, $p=\text{cost}$
- isoterma, $T=\text{cost}$
- isocora, $v=\text{cost}$
- adiabatica, $q=0$
- isoentalpica, $\Delta h=0$
- isoentropica, $\Delta s=0$



CAMBIAMENTI DI FASE

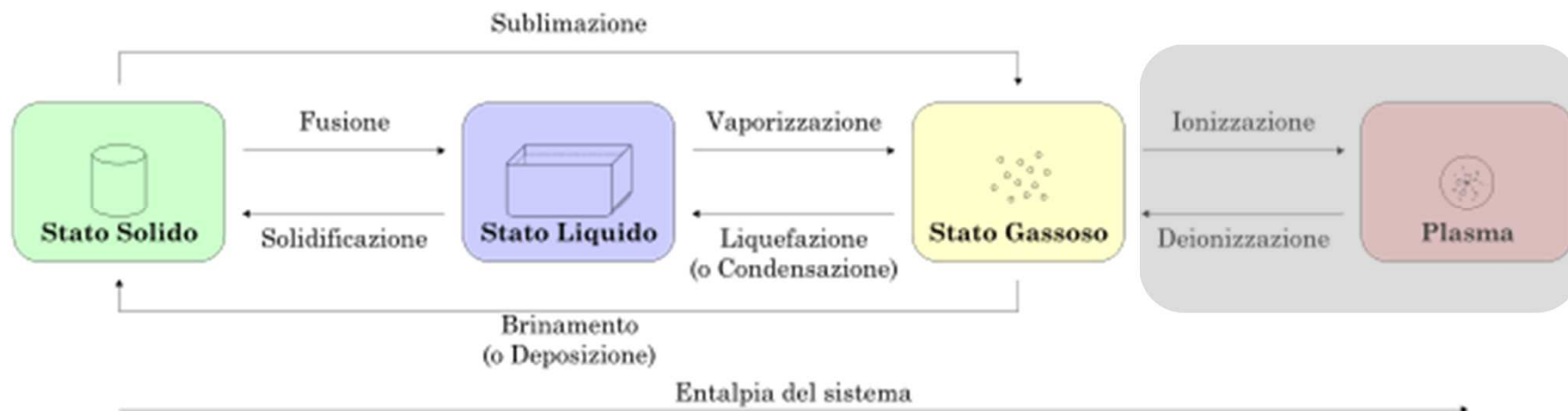
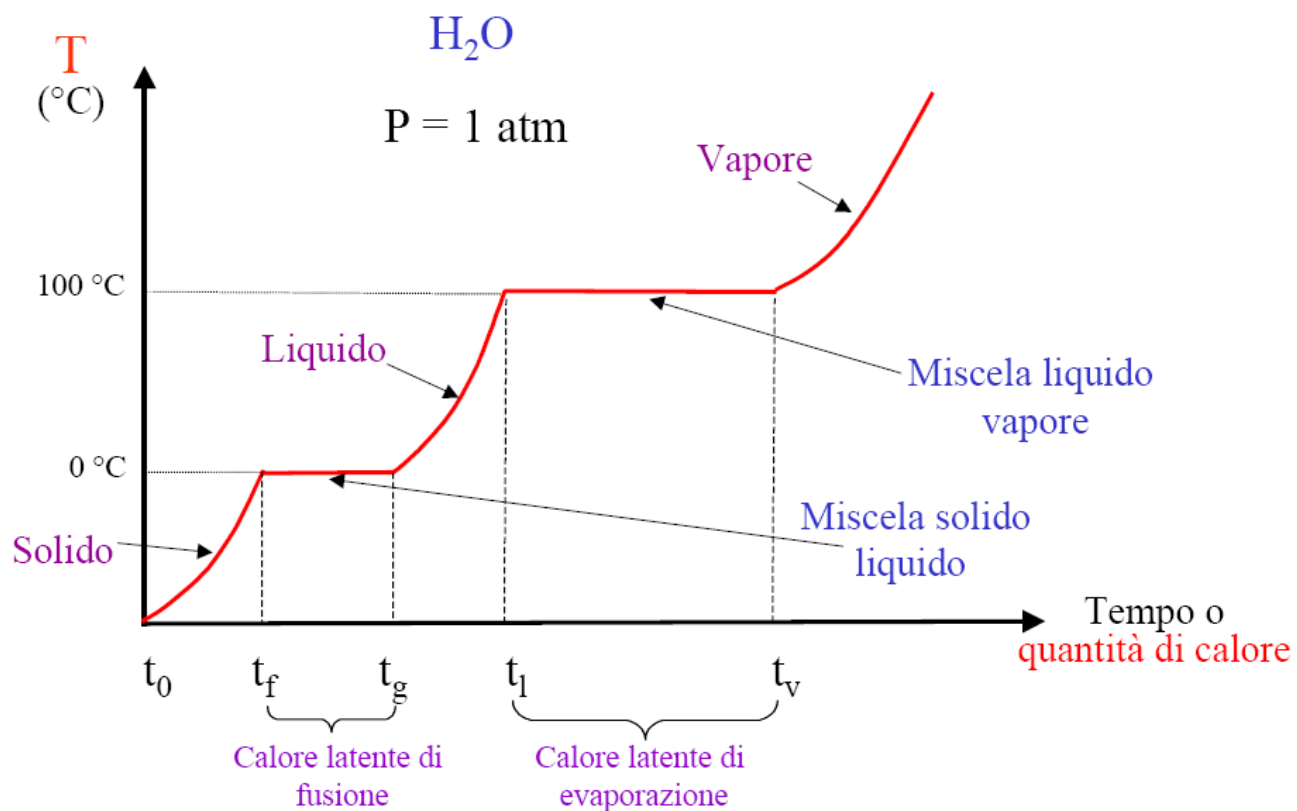


$$N = C + 2 - F$$

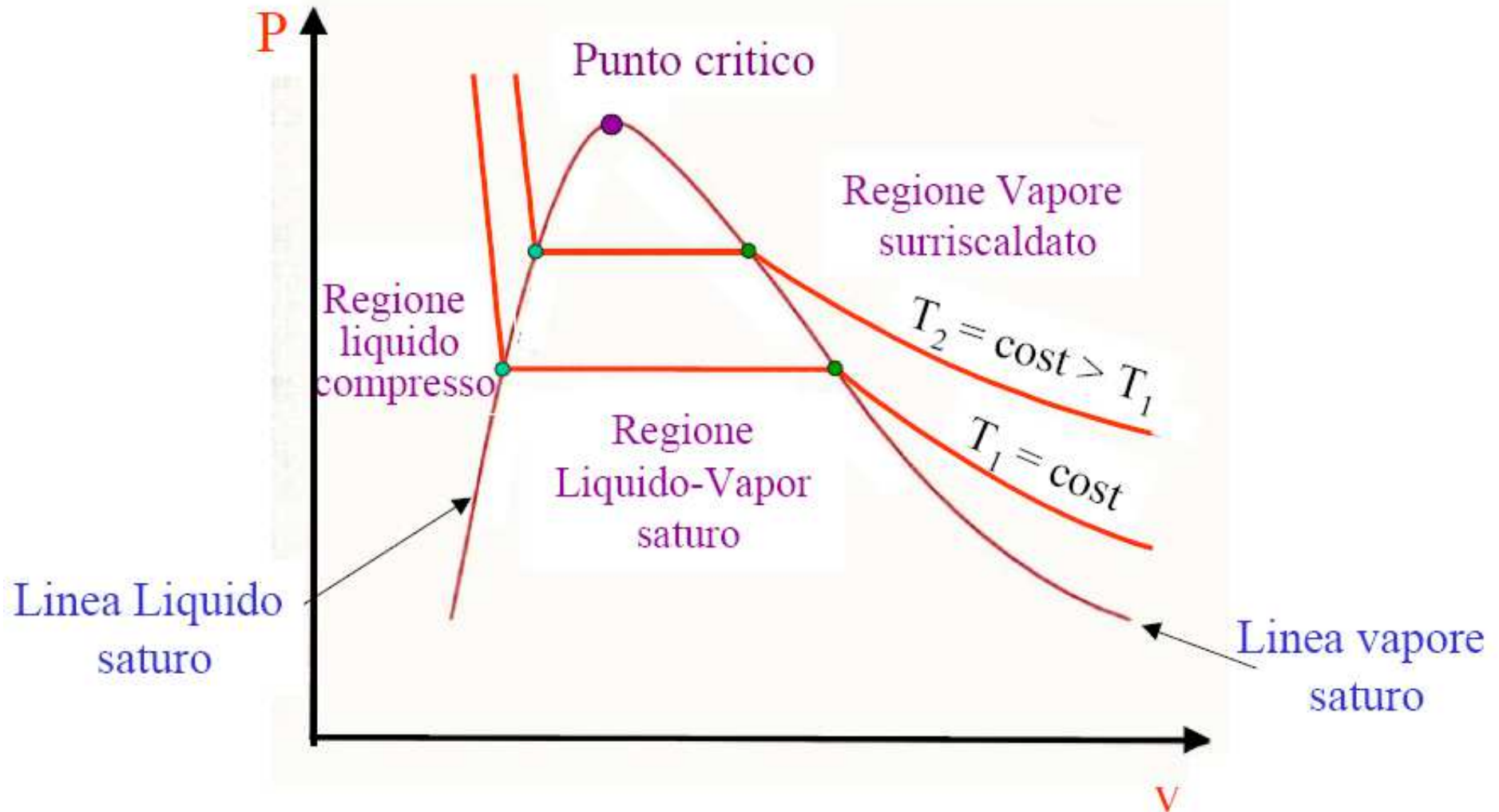


CAMBIAMENTI DI FASE

$$N = C + 2 - F$$

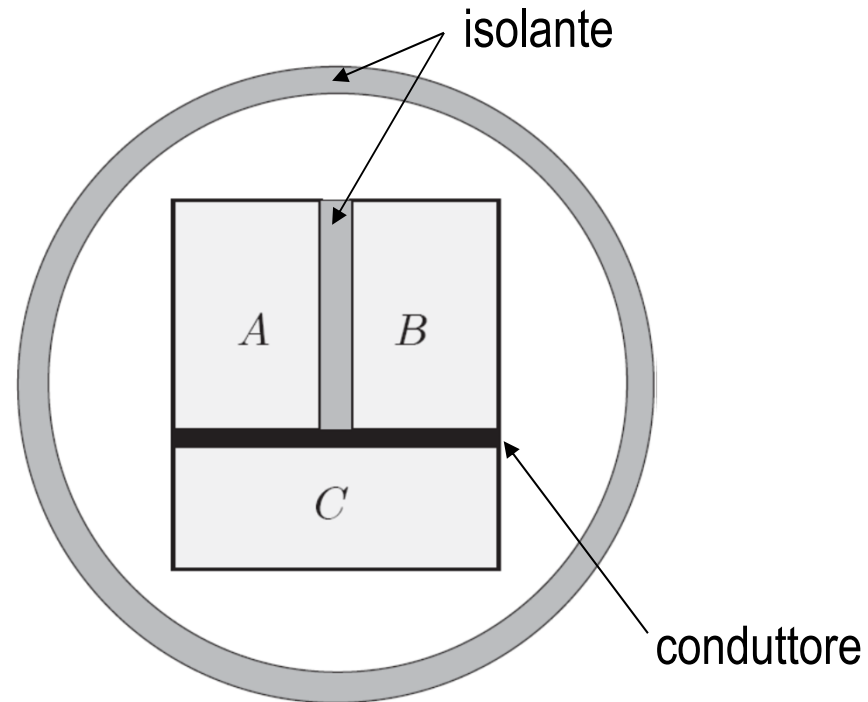


Piano di Clapeyron e grafico di Andrews



PRINCIPIO ZERO DELLA TERMODINAMICA

Due corpi in equilibrio termico con un terzo, sono tra loro in equilibrio termico.



La temperatura è la proprietà che esplicita l'equilibrio termico tra due o più sistemi. La presenza di un gradiente termico tra due sistemi instaura il trasferimento di una specifica energia (CALORE), dal sistema a maggior temperatura a quello a minor temperatura, sino al raggiungimento di una temperatura di equilibrio uguale per entrambi.

T - TEMPERATURA TERMODINAMICA (o assoluta)

La temperatura è una proprietà che non si misura direttamente, ma attraverso la misura di altre proprietà ad essa legate (pressione, dilatazione, resistenza elettrica, ...).

Si dimostra che *Temperatura Termodinamica* \equiv *temperatura misurata indirettamente*

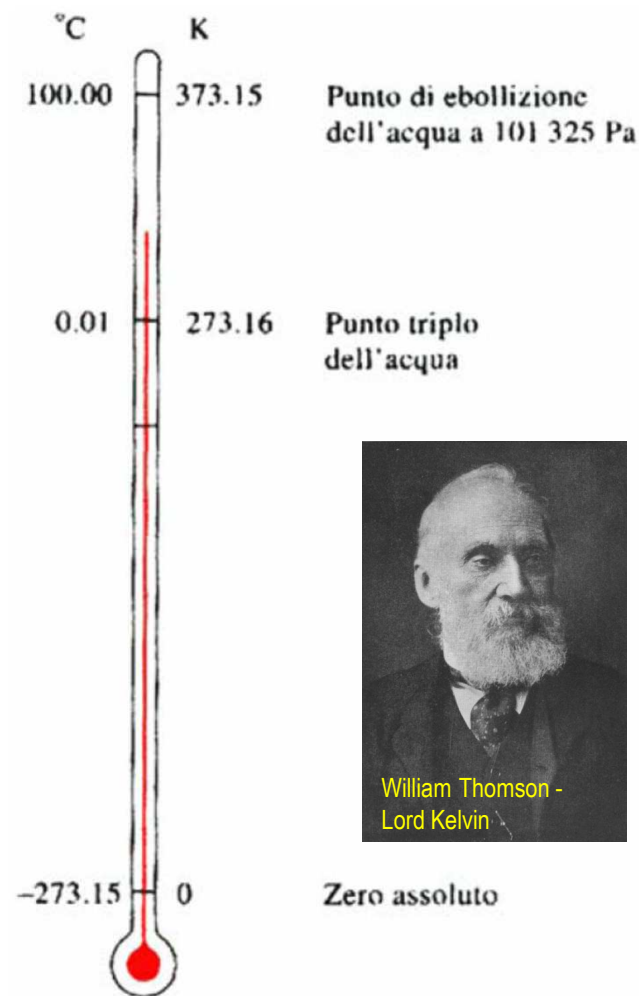
Il **Kelvin** è definito come $1/273,16$ della temperatura termodinamica del punto triplo dell'acqua. Con questa definizione il Kelvin è stato adottato nel 1954 dalla Conférence générale des poids et mesures come unità di temperatura del Sistema internazionale (SI).

Nel meeting del 2005 il Comité International des Poids et Mesures ha aggiunto la seguente precisazione alla definizione di kelvin: "... si riferisce ad acqua avente una composizione isotopica definita esattamente dai seguenti rapporti di sostanze: 0,00015576 moli di ^2H per mole di ^1H , 0,0003799 moli di ^{17}O per mole di ^{16}O , e 0,0020052 moli di ^{18}O per mole di ^{16}O "

Per "temperatura termodinamica del punto triplo dell'acqua" si intende la differenza di temperatura fra lo zero assoluto ($-273,15\text{ }^\circ\text{C}$) e il punto triplo dell'acqua ($+0,01\text{ }^\circ\text{C}$).

Lo zero della scala kelvin è lo zero assoluto della temperatura termodinamica.

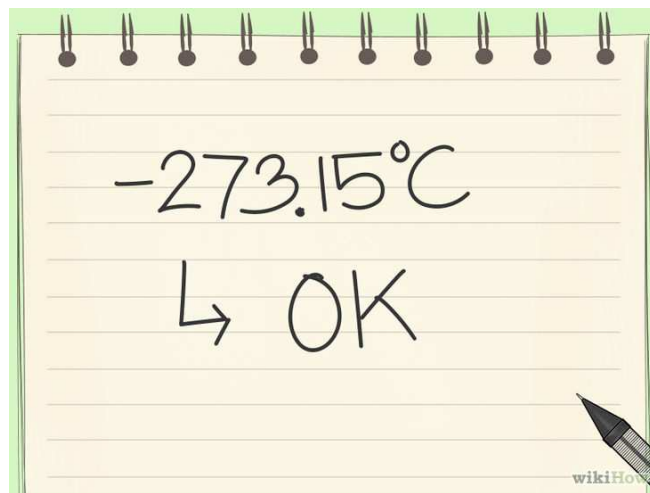
$$\theta = \lim_{p_3 \rightarrow 0} \left(\frac{\theta_3}{p_3} \cdot p \right)_{v=\text{cost.}}$$



TERZO PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA

Non è possibile raggiungere lo zero assoluto (0 K) attraverso un numero finito di operazioni

... to be continued



Walther Hermann Nernst
Nobel per la chimica, 1920

Q - CALORE (energia termica)

E' una forma di energia che si trasmette tra due sistemi a differente temperatura.

E' una grandezza di processo (δ), cioè dipende dalla trasformazione termodinamica.

Per convenzione, il calore assorbito dal sistema è assunto positivo.

Calore scambiato: $[Q] = J$

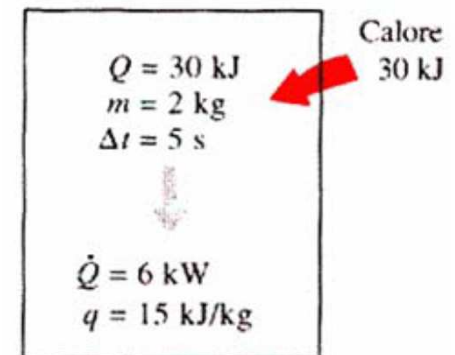
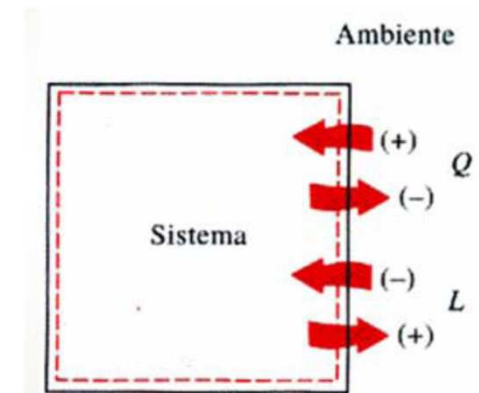
Potenza termica: $[\dot{Q}] = \frac{J}{s} = W$

In forma specifica: $[q] = \frac{J}{kg}$
 $[\dot{q}] = \frac{J}{kg \cdot s} = \frac{W}{kg}$

Per definizione:

$$Q = \int_1^2 \delta Q$$

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} \dot{Q}(t) \cdot dt$$



L – LAVORO (energia meccanica)

E' una forma di energia meccanica che il sistema scambia con l'ambiente.

E' una grandezza di processo (δ), cioè dipende dalla trasformazione termodinamica.

Per convenzione, il lavoro compiuto dal sistema sull'ambiente è assunto positivo.

Lavoro scambiato: $[L] = J$

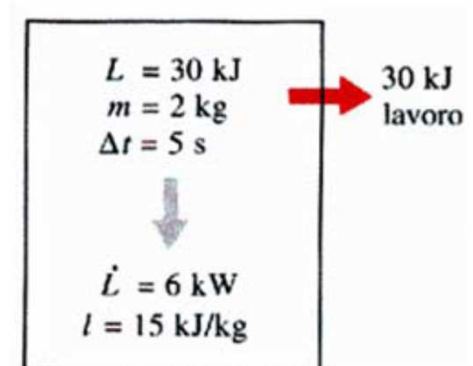
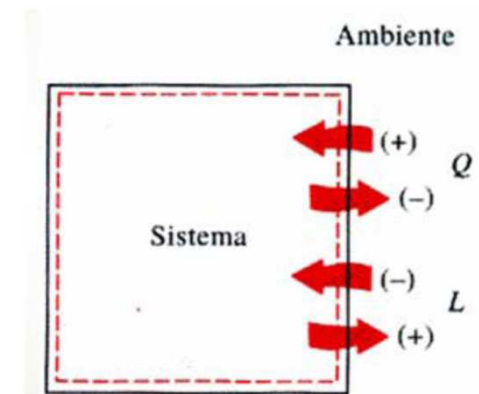
Potenza meccanica: $[\dot{L}] = \frac{J}{s} = W$

In forma specifica:
 $[l] = \frac{J}{kg}$
 $[i] = \frac{J}{kg \cdot s} = \frac{W}{kg}$

Per definizione:

$$L = \int_1^2 \delta L$$

$$L = \int_{t_1}^{t_2} \dot{L}(t) \cdot dt$$

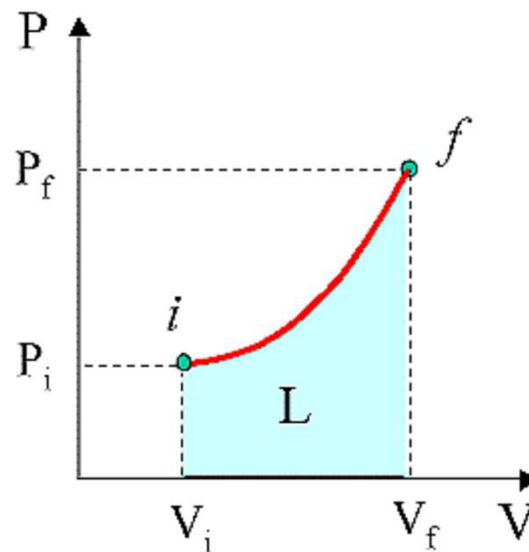
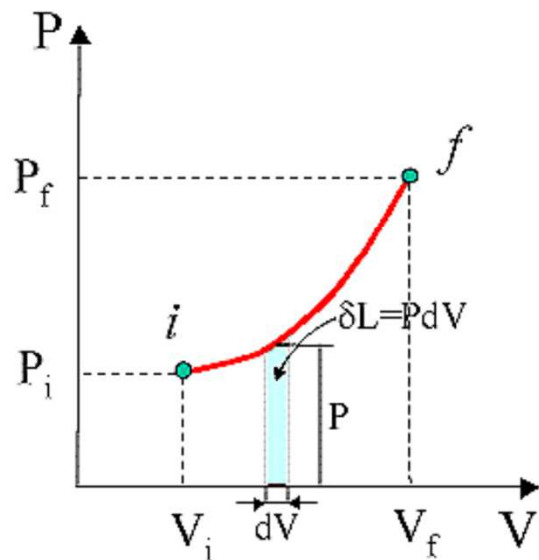
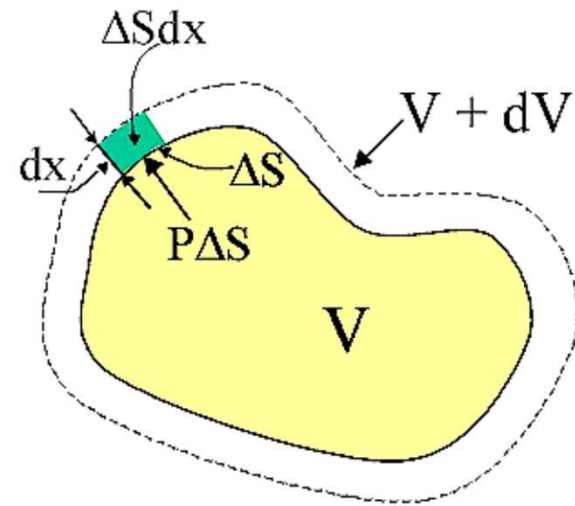


L - LAVORO (sistema chiuso → lavoro di volume)

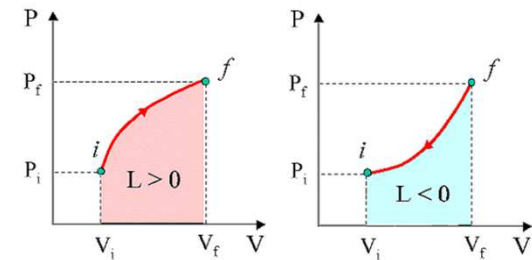
Se il confine del sistema termodinamico non è rigido, alla variazione del suo volume corrisponde un lavoro compiuto.

$$\delta L = p \cdot \Delta S \cdot dx = p \cdot dV$$

$$l = \frac{1}{m} \cdot \int_i^f \delta L = \int_{v_i}^{v_f} p \cdot dv$$

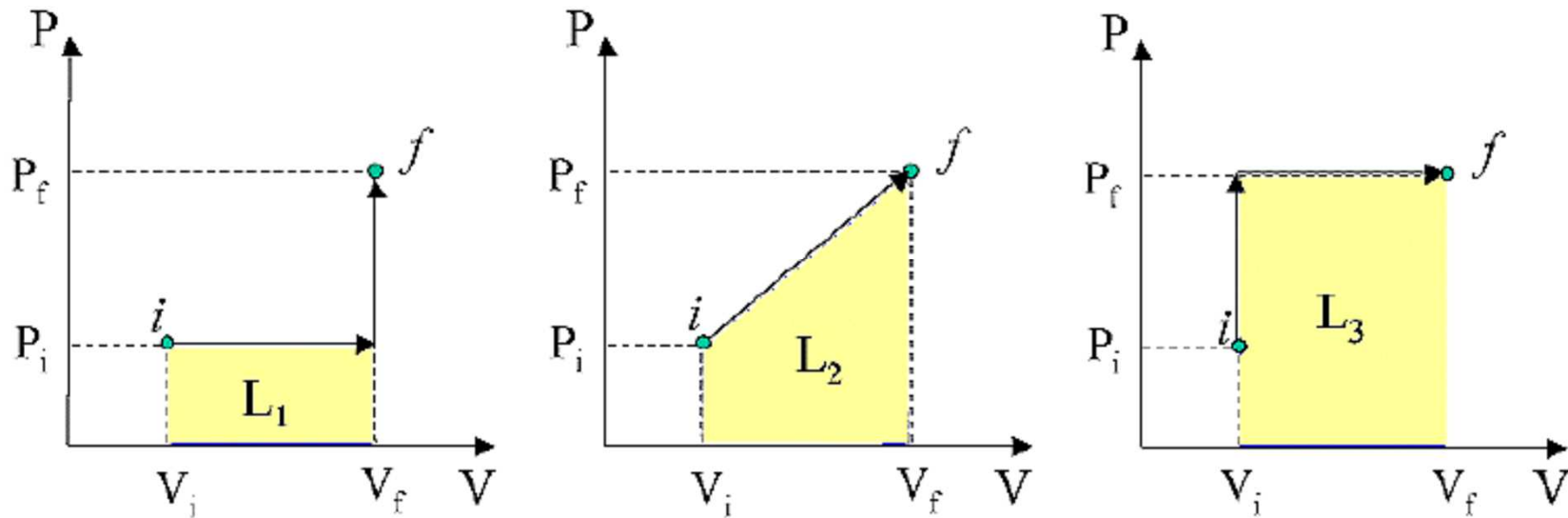


CONVENZIONE



L - LAVORO (sistema chiuso → lavoro di volume)

Il lavoro è una grandezza di processo (δ), cioè dipende dalla trasformazione compiuta dal sistema.



$$l_{chiuso} = \frac{1}{m} \cdot \int_i^f \delta L = \int_{v_i}^{v_f} p \cdot dv$$

E_m - ENERGIA MECCANICA

E' l'energia posseduta dal sistema in relazione alla propria velocità e alla propria massa.

Energia cinetica: $E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$

Energia potenziale: $E_p = m \cdot g \cdot z$

$$[E] = J$$

In termini specifici: $e_c = \frac{E_c}{m} = \frac{1}{2} \cdot v^2$

$$e_p = \frac{E_p}{m} = g \cdot z$$

In termini infinitesimi: $de_c = v \cdot dv$

$$de_p = g \cdot dz$$



Valvola di scarico del vapore chiusa, quindi il sistema è di tipo chiuso

Il sistema scambia calore (+) con l'ambiente, ma non lavoro, perché indeformabile

Dove accumula il sistema l'energia termica continuamente ceduta dalla fiamma?

U - ENERGIA INTERNA

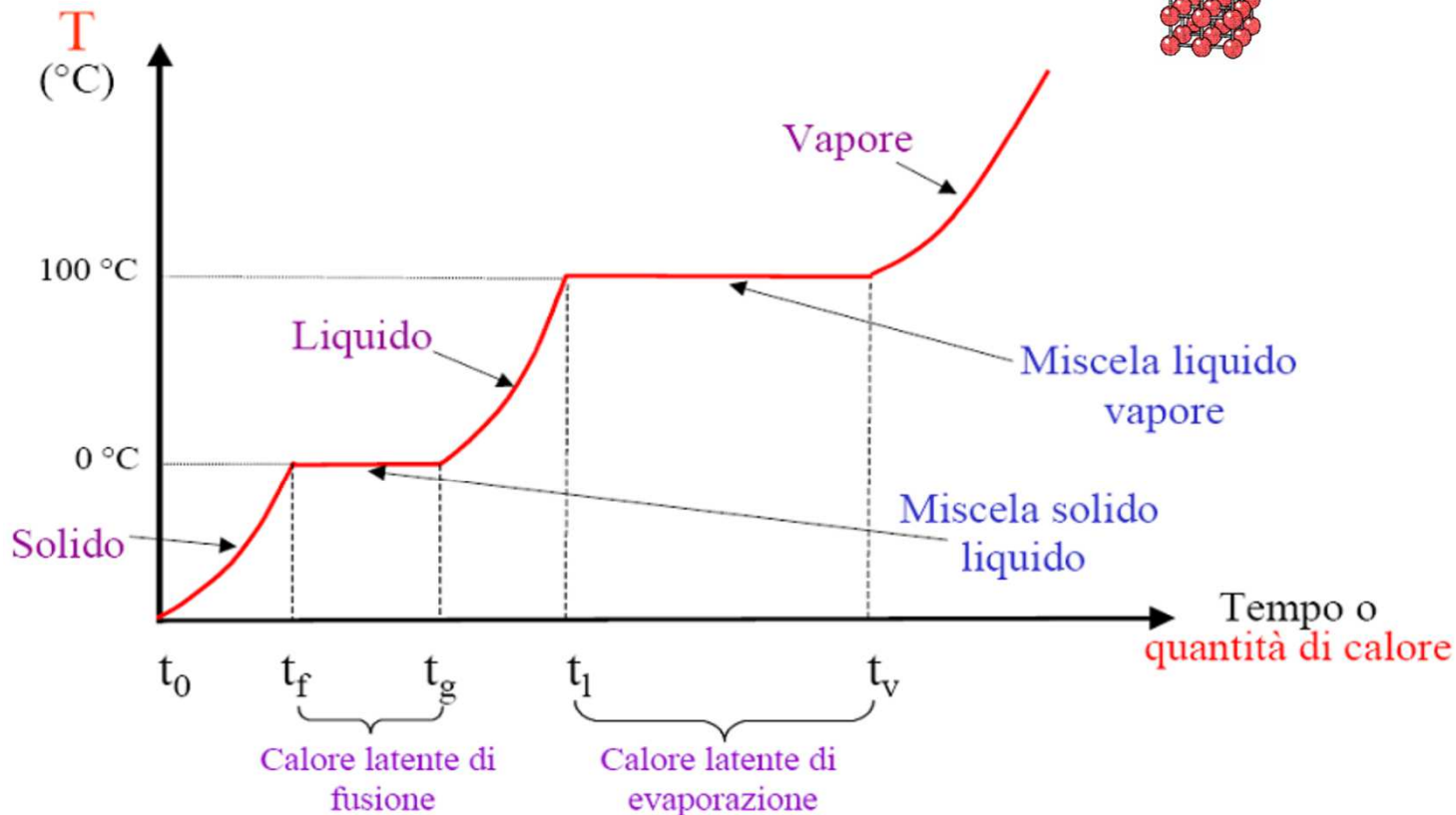
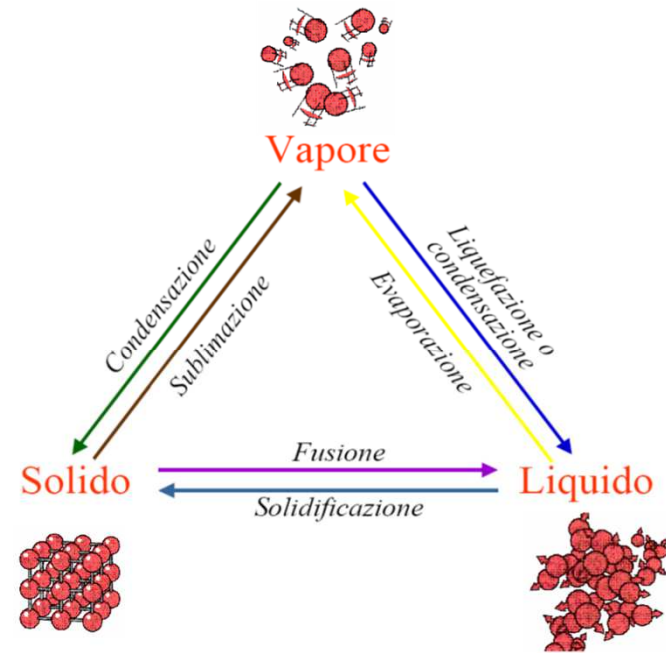
$$[U] = J$$

$$[u] = \left[\frac{U}{m} \right] = \frac{J}{kg}$$

U - ENERGIA INTERNA

Nell'approccio macroscopico rappresenta la somma delle forme energetiche a microscala:

- energia latente, legata allo stato fisico del sistema (solido, liquido, gassoso)
- energia sensibile, legata all'agitazione molecolare, detta anche agitazione termica

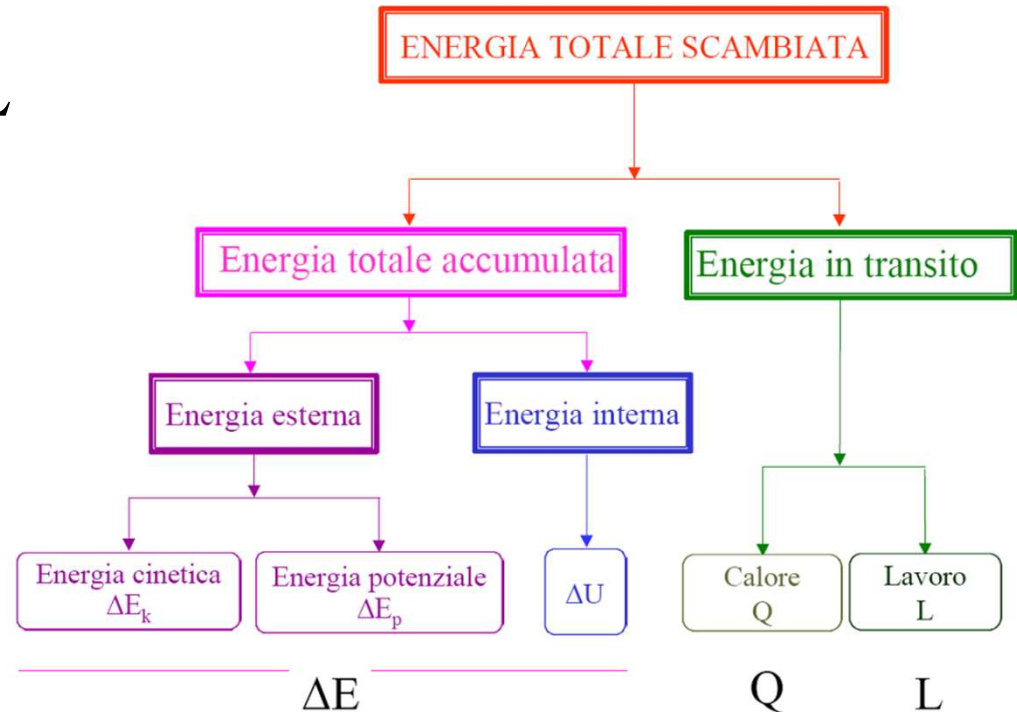
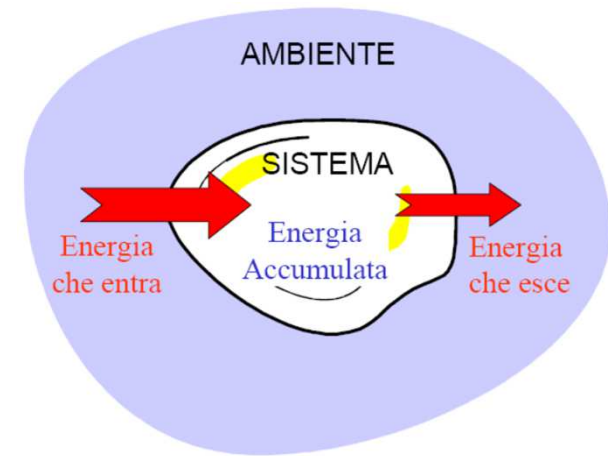
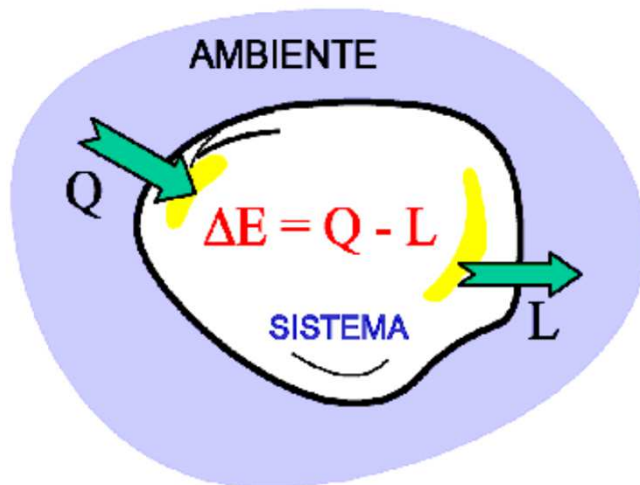


1° PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA (sistemi chiusi)

L'energia non può essere creata, né distrutta, ma può solo cambiare forma: **l'energia si conserva.**

Per un sistema chiuso in cui non avvengono reazioni chimiche e per il quale sono invariante le forme energetiche elettromagnetiche, il bilancio energetico, escludendo le trasformazioni massa \leftrightarrow energia, diviene:

$$\Delta U + \Delta E_m = Q - L$$

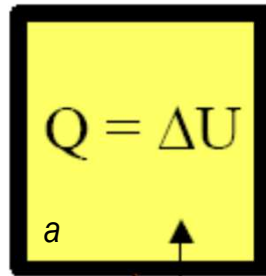


1° PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA (sistemi chiusi)

se $\Delta E_m = 0$

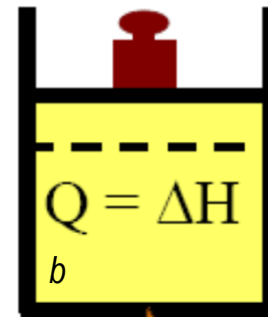
$$\Delta U = Q - L$$

$V = \text{costante}$
(confine rigido)



$$\Delta U_a = Q$$

$V = \text{non costante}$
(confine deformabile)



$$\Delta U_b = Q - P\Delta V$$

$$\Delta U_a > \Delta U_b$$

$$P = \text{costante} = F/A + P_{\text{atm}}$$

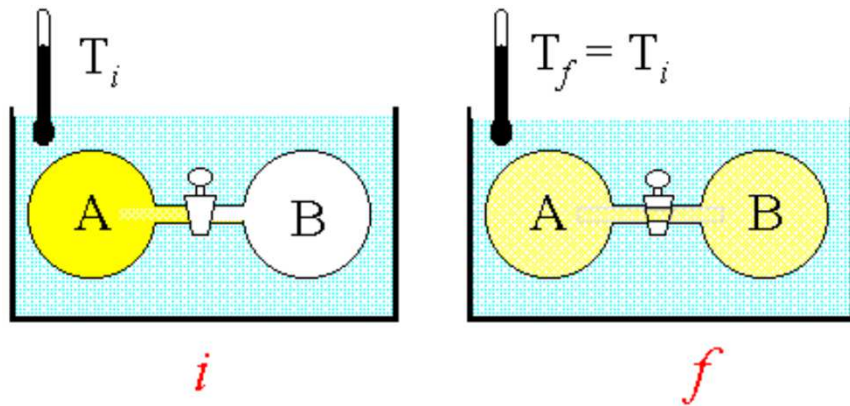
Si definisce entalpia (H, h) come:

$$H = U + P^*V$$

$$h = u + P^*v$$

U - ENERGIA INTERNA

Nell'espansione di un gas a bassa pressione nel vuoto, non si osserva variazione alcuna della temperatura ($dT=0$). Inoltre:

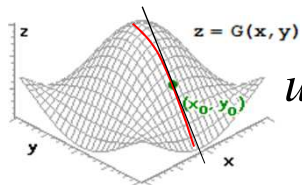


- Sistema chiuso ($dm=0$)
- Sistema stazionario ($\Delta E_m=0$)
- Sistema adiabatico ($Q=0$)
- Espansione nel vuoto ($L=0$)

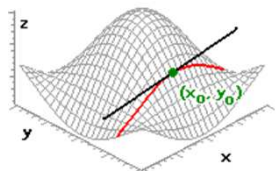
$$\Delta U = 0$$

$$\Delta U + \Delta E_m = Q - L$$

Se il gas non cambia stato fisico, due coordinate termodinamiche sono sufficienti (GIBBS) a definirne univocamente lo stato termodinamico. Quindi:



$$u = u(p, T) \Rightarrow du = 0 = \left. \frac{\partial u}{\partial T} \right|_p dT + \left. \frac{\partial u}{\partial p} \right|_T dp \stackrel{dT=0}{\Leftrightarrow} \left. \frac{\partial u}{\partial p} \right|_T = 0$$



$$u = u(v, T) \Rightarrow du = 0 = \left. \frac{\partial u}{\partial T} \right|_v dT + \left. \frac{\partial u}{\partial v} \right|_T dv \stackrel{dT=0}{\Leftrightarrow} \left. \frac{\partial u}{\partial v} \right|_T = 0$$

$$u = u(T)$$

c - CALORE SPECIFICO

E' il calore che deve essere ceduto per aumentare di un grado l'unità di massa.
Per un liquido o un solido ($\rho \approx$ costante), non dipendente dal tipo di trasformazione.
Per un gas invece varia significativamente, allora:

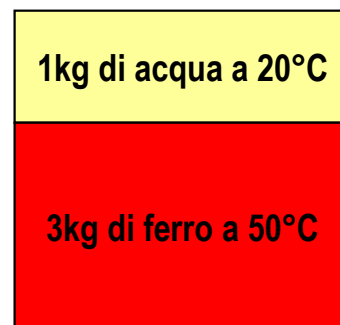
CALORE SPECIFICO A VOLUME COSTANTE $\rightarrow c_v = \frac{du}{dT}\bigg|_v \left(= \frac{\delta q}{dT}\bigg|_v \right)$

C - CAPACITA' TERMICA

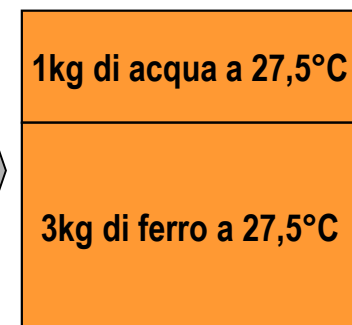
E' definita come: $C = m \cdot c$

$$c_{acqua} = 4,186 \text{ kJ} / (\text{kg} * \text{K})$$

$$c_{ferro} = 0,464 \text{ kJ} / (\text{kg} * \text{K})$$



$$T_{finale} = \frac{\sum C_i \cdot T_i}{\sum C_i}$$





Considero il solo giubbotto, che suppongo indeformabile.

Sistema aperto, perché scambia aria con l'ambiente

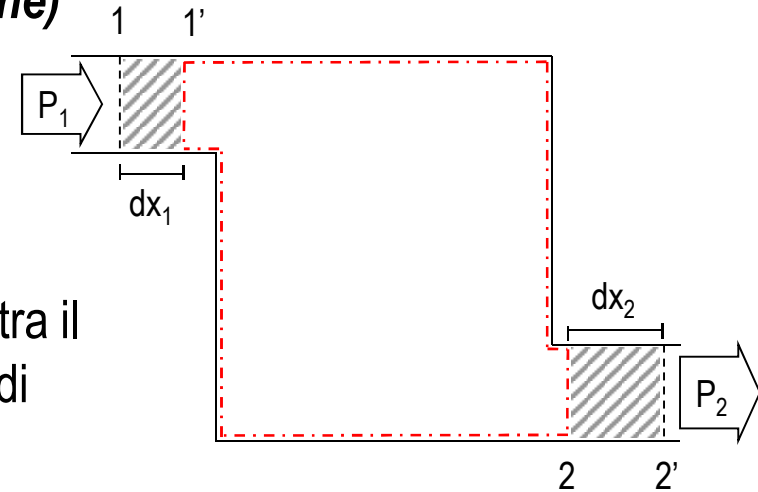
Il sistema scambia calore (+) con l'ambiente, ma non lavoro per deformazione.

E' sufficiente considerare la sola energia interna come termine di accumulo?

L - LAVORO (sistema aperto → lavoro di pressione)

L'analisi di un sistema aperto fa riferimento ad un volume di controllo virtualmente indeformabile, quindi il lavoro di volume è nullo.

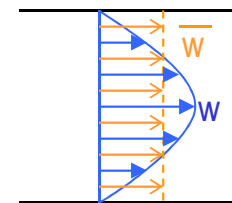
In presenza di scambio di massa nell'unità di tempo tra il sistema e l'ambiente, viene tuttavia svolto un lavoro di pressione:



- dall'ambiente sul sistema (LAVORO DI INTRODUZIONE) $P_1 \cdot S_1 \cdot dx_1 = P_1 \cdot S_1 \cdot \bar{w}_1 \cdot dt$

- dal sistema sull'ambiente (LAVORO DI ESPULSIONE) $P_2 \cdot S_2 \cdot dx_2 = P_2 \cdot S_2 \cdot \bar{w}_2 \cdot dt$

$$\bar{w} = \frac{1}{S} \int_0^S w \cdot dS$$



Nota la portata in massa, il generico lavoro specifico è esprimibile nell'unità di tempo come:

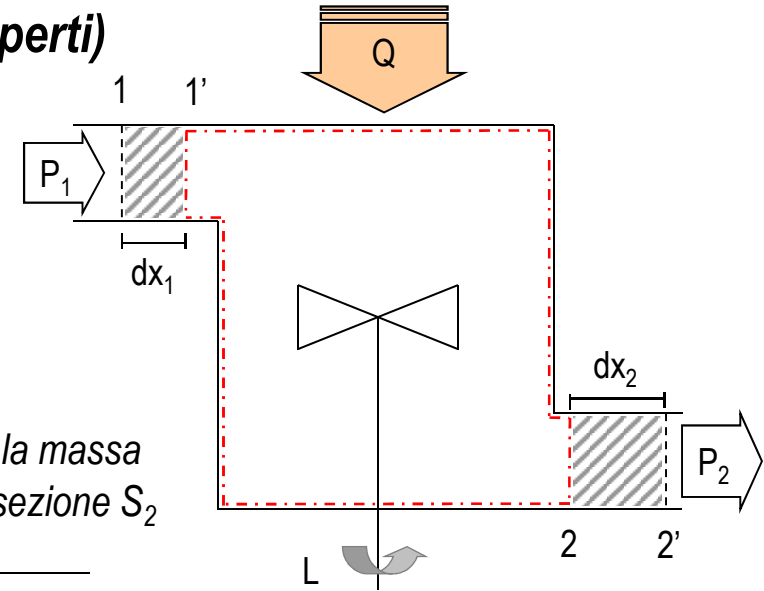
$$l = \frac{L}{m} = \frac{P \cdot S \cdot \Delta x}{\dot{m} \cdot \Delta t} = \frac{P \cdot \dot{V}}{\dot{m}} = P \cdot \frac{1}{\rho} = P \cdot v$$

1° PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA (sistemi aperti)

In condizioni stazionarie:

$$\Delta \dot{E}_{sistema} = 0$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$$



Energia introdotta con la massa entrante in $d\tau$ alla sezione S_1

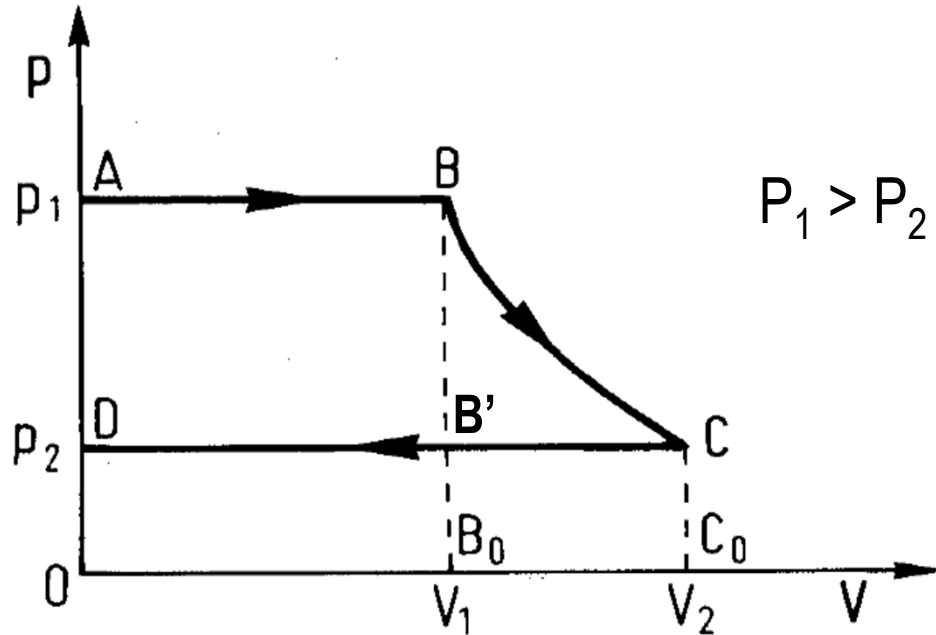
Energia persa con la massa uscente in $d\tau$ alla sezione S_2

$$\dot{m} \cdot \left(u_1 + \frac{1}{2} w_1^2 + g z_1 \right) + \underbrace{p_1 \cdot S_1 \cdot w_1}_{\text{Lavoro di introduzione in } d\tau} - \dot{m} \cdot \left(u_2 + \frac{1}{2} w_2^2 + g z_2 \right) - \underbrace{p_2 \cdot S_2 \cdot w_2}_{\text{Lavoro di espulsione in } d\tau} + \dot{Q} - \dot{L} = \Delta \dot{E} = 0$$

$$(u_2 + p_2 \cdot v_2 - u_1 - p_1 \cdot v_1) + g \cdot (z_2 - z_1) + \left(\frac{1}{2} w_2^2 - \frac{1}{2} w_1^2 \right) = q - l$$

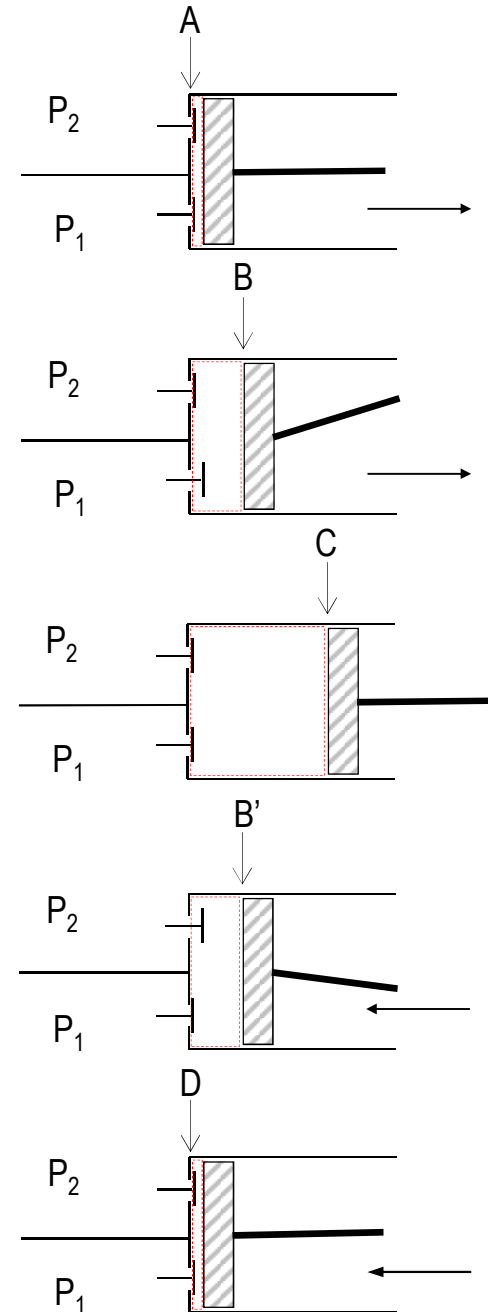
$$(h_2 - h_1) + \Delta e_m = q - l$$

L - LAVORO (sistema aperto → lavoro di pressione)



$$l_p = \int_0^{v_1} p \cdot dv + \int_{v_1}^{v_2} p \cdot dv + \int_{v_2}^0 p \cdot dv = - \int_{p_1}^{p_2} v \cdot dp$$

$$l_{aperto} = \frac{1}{m} \cdot \int_i^f \delta L = \int_{p_i}^{p_f} v \cdot dp$$



1° PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA

Per un sistema in cui non avvengono reazioni chimiche e per il quale sono trascurabili le forme energetiche elettromagnetiche e le variazioni di energia meccanica, la variazione energetica tra due stati termodinamici di equilibrio diviene:

$$\textit{per un sistema chiuso} \quad \Delta U = Q - L \quad / \quad \Delta u = q - l$$

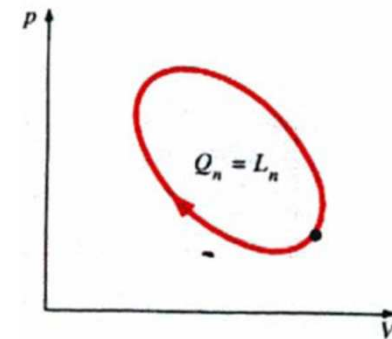
$$\textit{per un sistema aperto} \quad \Delta H = Q - L \quad / \quad \Delta h = q - l$$

Se la trasformazione è ciclica $\Delta U = \Delta H = 0 \Rightarrow Q = L$

Se la trasformazione è adiabatica ($Q=0$) \Rightarrow

$$\Delta U = -L$$
$$\Delta H = -L$$

Se nella trasformazione non è compiuto alcun lavoro ($L=0$) \Rightarrow

$$\Delta U_{isocora} = Q$$
$$\Delta H_{isobara} = Q$$


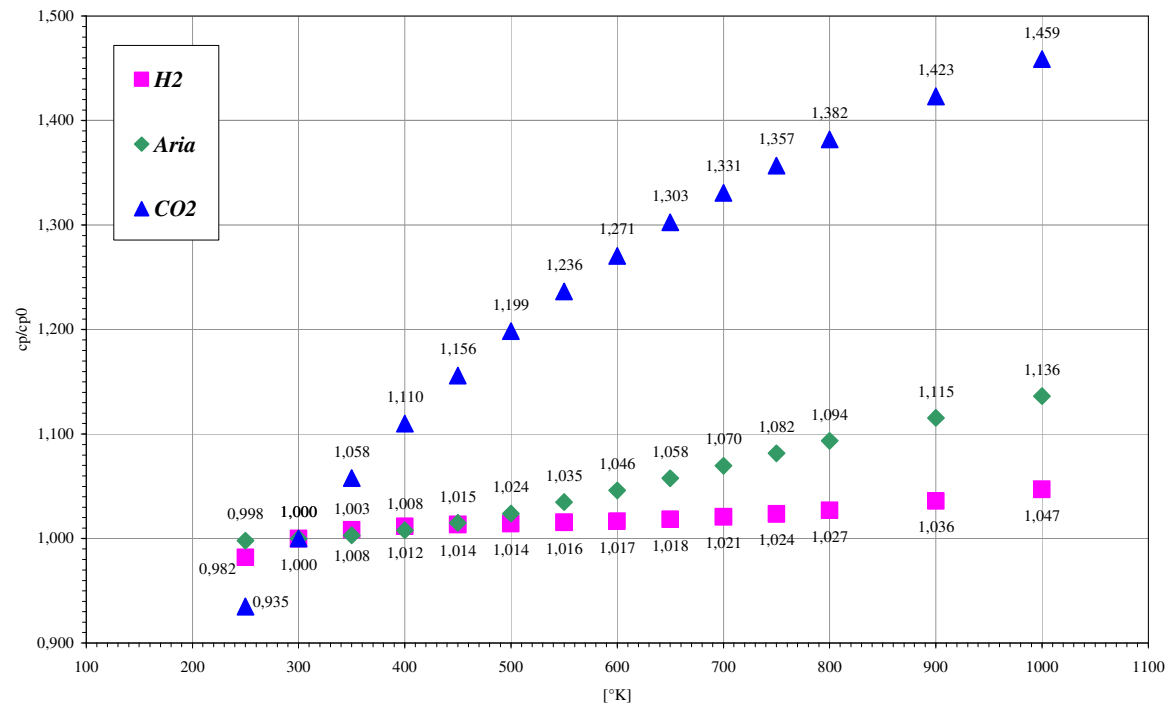
c - CALORE SPECIFICO

E' il calore che deve essere ceduto per aumentare di un grado l'unità di massa.
Per un liquido o un solido ($\rho \approx$ costante), non dipende dal tipo di trasformazione.
Per un gas invece varia significativamente, allora:

$$\text{CALORE SPECIFICO A PRESSIONE COSTANTE} \rightarrow c_p = \left. \frac{dh}{dT} \right|_p \left(= \left. \frac{\delta q}{dT} \right|_p \right)$$

Il calore specifico di un gas, aumenta con l'aumento della temperatura.

La variazione è tanto più sensibile, quanto più il gas ha massa molare elevata.



c - CALORE SPECIFICO

Calori specifici di gas a 25 °C

Gas	Formula	Cp0 kJ/(Kg•K)	Cv0 kJ/(Kg•K)	$\gamma=Cp/Cv$
Aria	--	1,0050	0,718	1,400
Argon	Ar	0,5203	0,3122	1,667
Butano	C ₄ H ₁₀	1,7164	1,5734	1,091
Carbonio, biossido di	CO ₂	0,8460	0,657	1,288
Carbonio, monossido di	CO	1,0400	0,744	1,398
Etano	C ₂ H ₆	1,7662	1,4897	1,186
Etilene	C ₂ H ₄	1,5482	1,2518	1,237
Elio	He	5,1926	3,1156	1,667
Idrogeno	H ₂	14,307	10,183	1,405
Metano	CH ₄	2,2537	1,7354	1,299
Neon	Ne	1,0299	0,6179	1,667
Azoto	N ₂	1,0390	0,743	1,398
Ottano	C ₈ H ₁₈	1,7113	1,6385	1,044
Ossigeno	O ₂	0,9180	0,658	1,395
Propano	C ₃ H ₈	1,6794	1,4909	1,126
Vapore	H ₂ O	1,8723	1,4108	1,327

Alcuni calori specifici dei liquidi

Liquidi	kJ/kg	Valori medi fra 0 e 100 °C
Acqua		4,186
Alcool etilico		2,398
Ammoniaca		1,738
Benzene		5,148
Etere etilico		2,260
Olio minerale		1,674
Petrolio		2,093

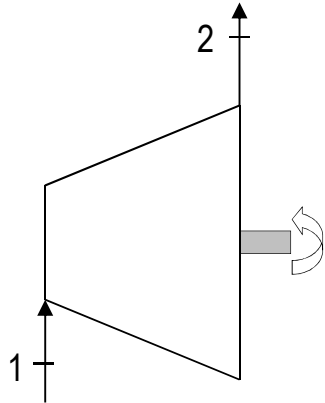
Alcuni calori specifici dei solidi

Solidi	kJ/kg	Valori medi fra 0 e 100 °C
Acciaio		0,502
Alluminio		0,920
Amianto		0,816
Asfalto		0,933
Bronzo		0,376
Cis		0,879
Ferro		0,464
Ghiaccio		2,038
Lana		1,716
Legno		2,38-2,72
Mattone		0,75-0,92
Pietrame		0,880
Rame		0,389
Vetro		0,837

APPLICAZIONI DEL I° PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA

$$\dot{m} \cdot \left[\left(\frac{1}{2} w_2^2 - \frac{1}{2} w_1^2 \right) + g \cdot (z_2 - z_1) + (h_2 - h_1) \right] = \dot{Q} - \dot{L}$$

TURBINA



$$w_1 \cong w_2$$

$$z_1 \cong z_2$$

$$q \approx 0$$

$$T_1 \gg T_2$$



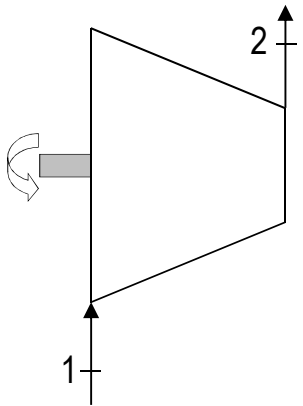
$$\Rightarrow -\dot{L} = \dot{m} \cdot \Delta h = \dot{m} \cdot \bar{c}_p \cdot (T_2 - T_1)$$

$$\dot{L}_{reale} = \eta_{mec} \cdot \dot{L}$$

APPLICAZIONI DEL I° PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA

$$\dot{m} \cdot \left[\left(\frac{1}{2} w_2^2 - \frac{1}{2} w_1^2 \right) + g \cdot (z_2 - z_1) + (h_2 - h_1) \right] = \dot{Q} - \dot{L}$$

COMPRESSORE



$$W_1 \cong W_2$$

$$z_1 \cong z_2$$

$$q \approx 0$$

$$T_1 \ll T_2$$



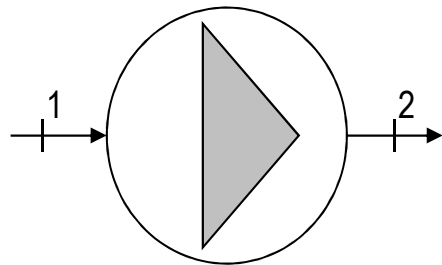
$$\Rightarrow -\dot{L} = \dot{m} \cdot \Delta h = \dot{m} \cdot \bar{c}_p \cdot (T_2 - T_1)$$

$$\dot{L}_{reale} = \frac{\dot{L}}{\eta_{mec}}$$

APPLICAZIONI DEL I° PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA

$$\dot{m} \cdot \left[\left(\frac{1}{2} w_2^2 - \frac{1}{2} w_1^2 \right) + g \cdot (z_2 - z_1) + (h_2 - h_1) \right] = \dot{Q} - \dot{L}$$

POMPA (liquidi)



$$w_1 \cong w_2$$

$$z_1 \cong z_2$$

$$q \approx 0$$

$$T_1 \cong T_2$$



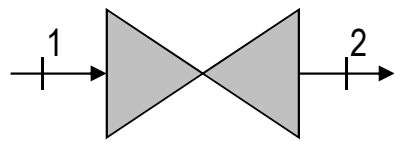
$$\Rightarrow -\dot{L} = \dot{m} \cdot \Delta h = \dot{m} \cdot (\Delta u + P_2 v_2 - P_1 v_1) \approx \dot{m} \cdot \frac{\Delta P}{\rho}$$

$$\dot{L}_{reale} = \frac{\dot{L}}{\eta_{mec}}$$

APPLICAZIONI DEL I° PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA

$$\dot{m} \cdot \left[\left(\frac{1}{2} w_2^2 - \frac{1}{2} w_1^2 \right) + g \cdot (z_2 - z_1) + (h_2 - h_1) \right] = \dot{Q} - \dot{L}$$

VALVOLA DI LAMINAZIONE



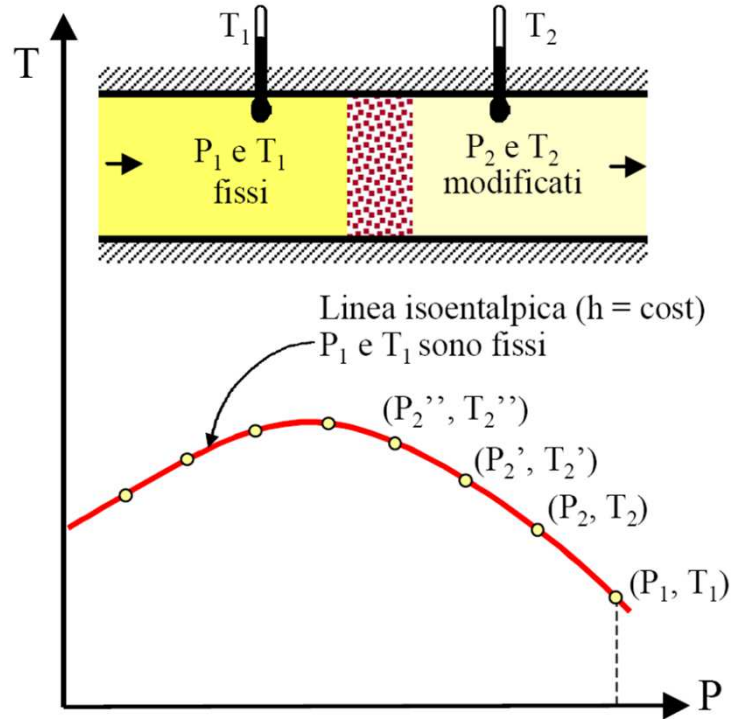
$$W_1 = W_2$$

$$Z_1 = Z_2$$

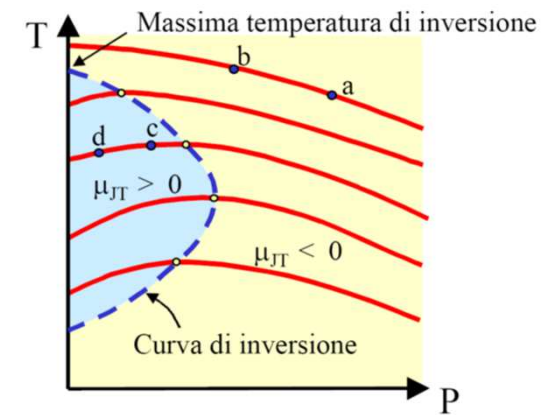
$$q = 0$$

$$l = 0$$

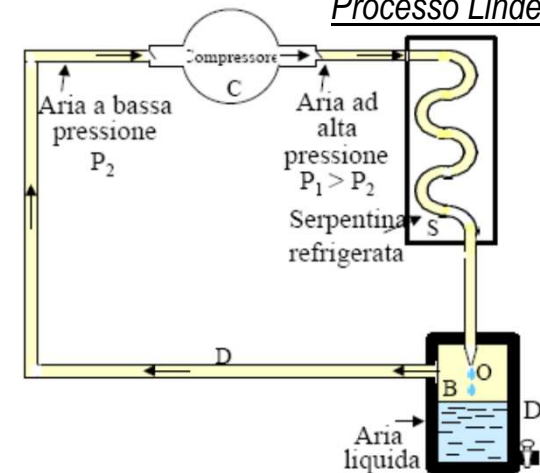
$$\Rightarrow \Delta h = 0$$



Effetto Joule-Thomson



Processo Linde



GAS PERFETTI

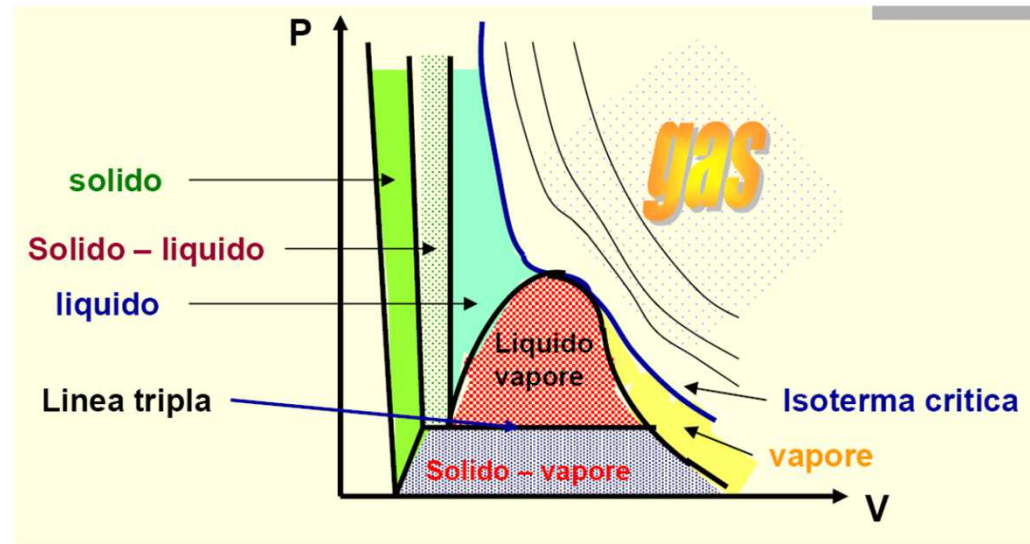
E' un gas per il quale:

- le forze di interazione molecolare sono trascurabili
- il volume occupato dalle molecole è trascurabile

$$p \cdot v = R \cdot T$$

$$R = \frac{R_u}{M}$$

$$R_u = 8,314 \frac{kJ}{kmol \cdot K}$$



Ogni mole a 0°C e 1 atm, occupa il medesimo volume (22,414 litri)

$$p \cdot \frac{V}{m} = \frac{R_u}{M} \cdot T \Leftrightarrow R_u = \frac{p \cdot V}{T} \cdot \frac{M}{m} = \frac{101,325 kPa \cdot 22,414 m^3}{273,15 K \cdot kmol} \cong 8,314 \frac{kJ}{kmol \cdot K}$$

GAS PERFETTI

Ad esempio, per l'ossigeno:

$$R = \frac{8,314 \frac{kJ}{kmol \cdot K}}{32 \frac{kg}{kmol}} = 0,26 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

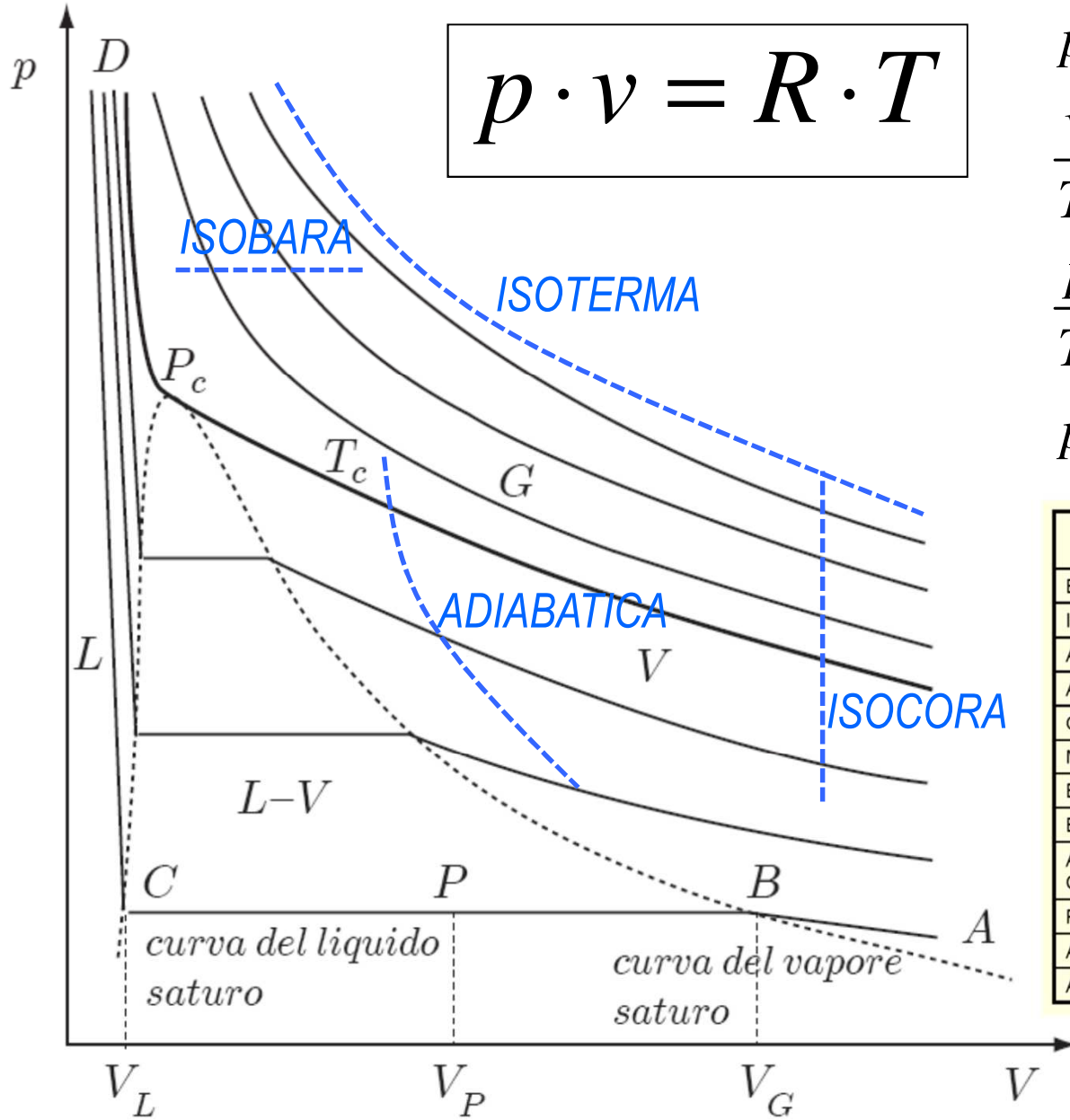
$$c_p = \frac{7}{2} R = 0,91 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

$$c_v = \frac{5}{2} R = 0,65 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

SOSTANZA	μ kg/kmol	$R = R/\mu$ J/kgK	c_p J/kgK	c_v J/kgK	k
Acetilene, C ₂ H ₂	26,039	319,43			
Acqua, H ₂ O	18,016	461,70	1872,3	1410,8	1,327
Alcool etilico C ₂ H ₅ OH	46,069	180,48	2496,3	2315,8	1,078
Alcool metilico, C ₃ H ₃ OH	32,04	259,5			
Ammoniaca, NH ₃	17,032	488,38	2130,0	1641,8	1,297
Anidride carbonica, CO ₂	44,012	188,99	841,8	652,9	1,289
Anidride solforosa, SO ₂	64,066	129,83			
Argon, Ar	39,950	208,21	520,3	312,2	1,667
Aria	28,968	287,13	1003,5	716,5	1,400
Azoto, N ₂	28,014	296,91	1041,6	744,8	1,400
n-Butano, C ₄ H ₁₀	58,124	143,04	1716,4	1573,4	1,091
Cloro, Cl	70,91	117,3			
Cloroformio, C H Cl ₃	119,38	69,64			
Elio, He	4,0028	2078,0	5192,6	3115,6	1,667
n-Esano, C ₆ H ₁₄	507,9	3,03			
Etano, C ₂ H ₆	30,071	276,60	1766,2	1489,7	1,186
Etilene, C ₂ H ₄	28,055	296,48	1548,2	1251,8	1,237
Freon 12 CCl ₂ F ₂	120,914	68,77			
Idrogeno, H ₂	2,0158	4126,4	14209,1	10084,9	1,409
Kripton, Kr	83,8	99,21			1,667
Metano, CH ₄	16,044	518,46	2253,7	1735,4	1,299
Metanolo CH ₃ OH	32,042	259,48	1405,0	1145,5	1,227
Monoss. di carbonio, CO	28,012	296,93	1041,3	744,5	1,400
Neon, Ne	20,184	412,10	1029,9	617,9	1,667
Ossido di azoto, NO	30,007	277,19			
Ossigeno, O ₂	31,891	260,83	921,6	661,8	1,393
Ottano, C ₈ H ₁₈	114,23	72,79	1711,3	1638,5	1,044
Propano, C ₃ H ₈	44,097	188,55	1679,4	1490,9	1,126
R134a, C F ₃ C H ₂ F	102,03	81,49			
Xenon, Xe	131,3	63,32			1,667

GAS PERFETTI

$$p \cdot v = R \cdot T$$



$$p \cdot v = \text{cost.} \quad \text{ISOTERMA}$$

$$\frac{v}{T} = \text{cost.} \quad \text{ISOBARA}$$

$$\frac{p}{T} = \text{cost.} \quad \text{ISOCORA}$$

$$p \cdot v^\gamma = \text{cost.} \quad \text{ADIABATICA}$$

	Tc (K)	Pc (MPa)	Vc (cm ³ /mole)	ρc (kg/mole)
Elio	5.3	0.23	58	69
Idrogeno	33.3	1.3	64.5	31
Azoto	126.2	3.39	90	311
Argon	150.9	4.91	85.0	531
Ossigeno	154.8	5.08	74.4	430
Metano	191	4.64	98.8	162
Etilene	283.1	5.19	124	225
Etano	305.4	4.88	143	211
Anidride Carbonica	304.2	8.1	95.6	460
Propano	369.9	4.2	200	220
Ammoniaca	405.6	11.4	72.4	235
Acqua	647.3	22.12	45	400

GAS REALI

Il comportamento dei gas reali è, con buona approssimazione, quello del modello di gas perfetto unicamente per temperature superiori a $2T_c$ oppure in condizioni di basse pressioni ed elevati volumi specifici.

$$T_r = \frac{T}{T_c}; p_r = \frac{p}{p_c}; v_r = \frac{v}{v_c}$$

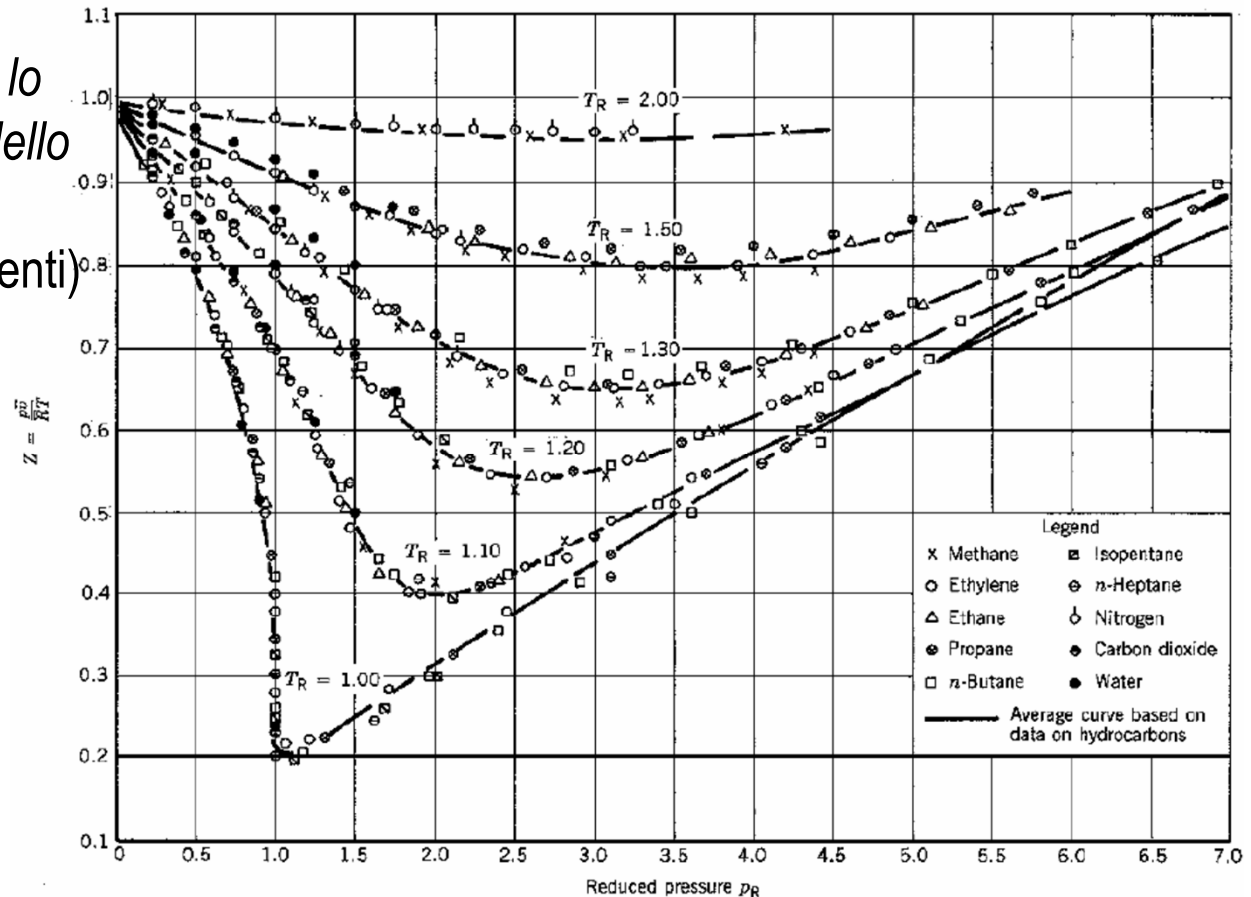
Si dimostra che:

“nelle medesime coordinate ridotte, tutti i gas reali hanno lo stesso scostamento dal modello di gas perfetto”

(Legge degli stati corrispondenti)

Tale scostamento è detto **FATTORE di COMPRESSIBILITA'**:

$$Z = \frac{v_{reale}}{v_{ideale}} = \frac{v_{reale} \cdot p}{R \cdot T}$$

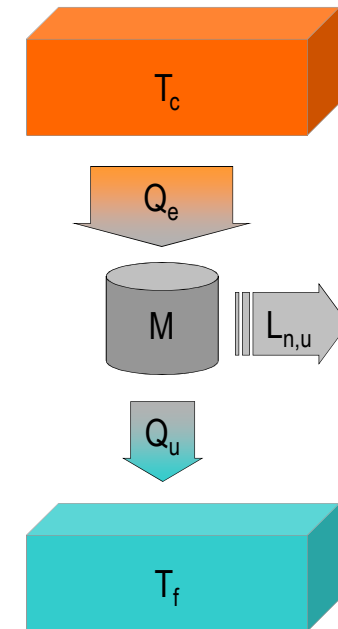


MACCHINE TERMICHE

L'effetto ricercato è la produzione di lavoro utile

Attuano un ciclo termodinamico diretto (sorgente → pozzo):

- assorbendo il calore Q_e dalla sorgente
- trasformando parzialmente Q_e in lavoro utile $L_{n,u}$
- cedendo il calore residuo Q_u con il pozzo per ripristinare le condizioni iniziali



Il ciclo termodinamico è eseguito da un fluido evolvente, che costituisce il vettore termico. Si definisce rendimento termodinamico della macchina termica il rapporto:

$$\eta_t = \frac{L_{n,u}}{Q_e} = \frac{Q_e - Q_u}{Q_e} = 1 - \frac{Q_u}{Q_e}$$

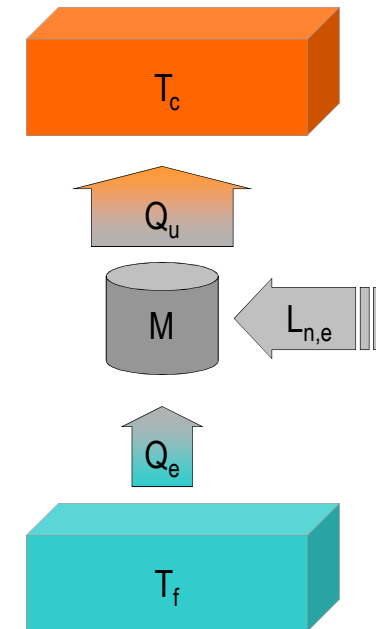
Il rendimento termodinamico è sempre inferiore all'unità, altrimenti sarebbe contraddetto il II° P.T.

MACCHINE FRIGORIFERE

L'effetto ricercato è il raffreddamento del pozzo

Attuano un ciclo termodinamico inverso (pozzo → sorgente):

- assorbendo il calore Q_e dal pozzo
- assorbendo il lavoro $L_{n,e}$
- cedendo il calore Q_u alla sorgente per ripristinare le condizioni iniziali



Il ciclo termodinamico è eseguito da un fluido evolvente, che costituisce il vettore termico. Si definisce coefficiente di prestazione della macchina frigorifera il rapporto:

$$COP_F = \frac{Q_e}{L_{n,e}} = \frac{Q_e}{Q_u - Q_e}$$

Il coefficiente di prestazione può assumere valori superiori all'unità.

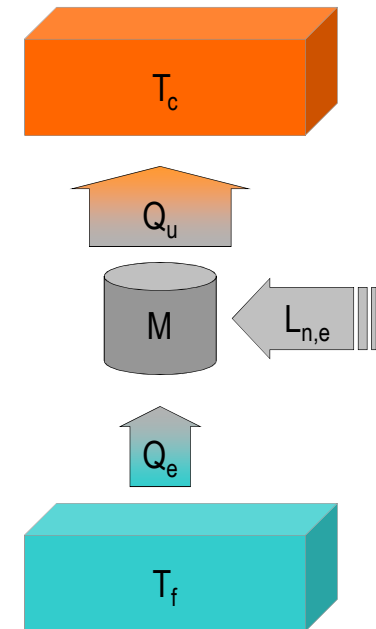
COP_F (Coefficient of Performance) \equiv EER (Energy Efficiency Ratio)

POMPE DI CALORE

L'effetto ricercato è il riscaldamento della sorgente

Attuano un ciclo termodinamico inverso (pozzo → sorgente):

- assorbendo il calore Q_e dal pozzo
- assorbendo il lavoro $L_{n,e}$
- cedendo il calore Q_u alla sorgente per ripristinare le condizioni iniziali

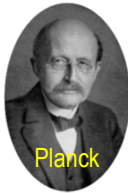
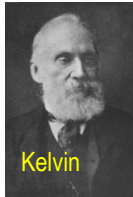


Il ciclo termodinamico è eseguito da un fluido evolvente, che costituisce il vettore termico. Si definisce coefficiente di prestazione della pompa di calore il rapporto:

$$COP_{PdC} = \frac{Q_u}{L_{n,e}} = \frac{Q_u}{Q_u - Q_e} = COP_F + 1$$

Il coefficiente di prestazione è sempre maggiore dell'unità.

II° PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA



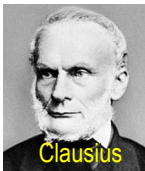
Kelvin-Planck:

E' impossibile attuare una trasformazione termodinamica *ciclica*, il cui unico risultato sia quello di trasformare completamente una quantità di calore in lavoro.

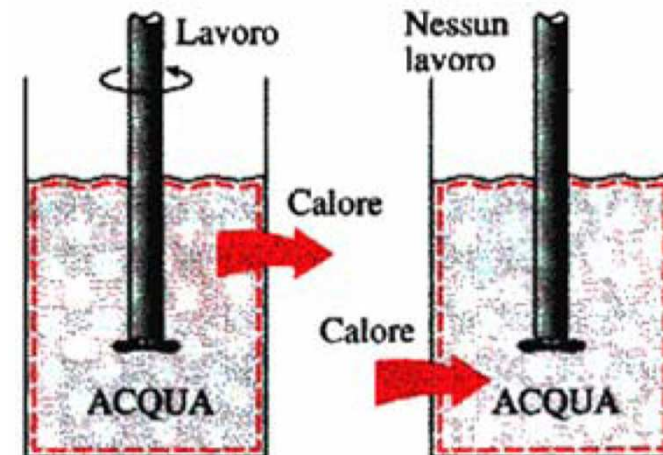


Clausius:

E' impossibile attuare una trasformazione termodinamica, il cui unico risultato sia quello di trasferire *completamente* una quantità di calore da una sorgente fredda (pozzo) ad una calda (sorgente).

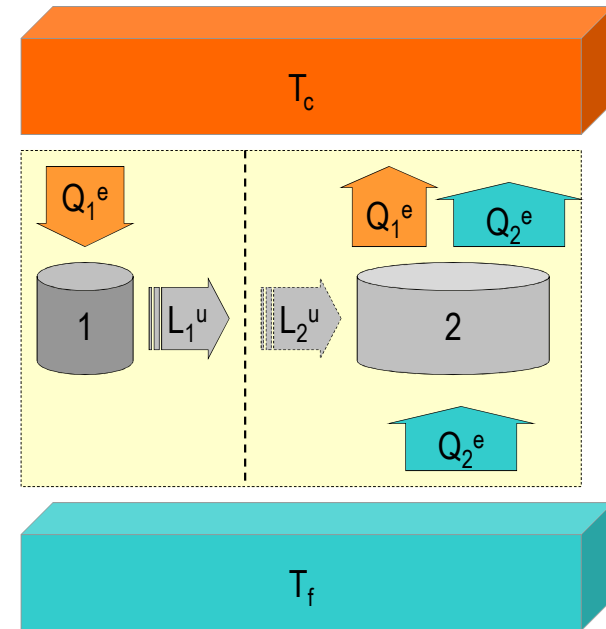
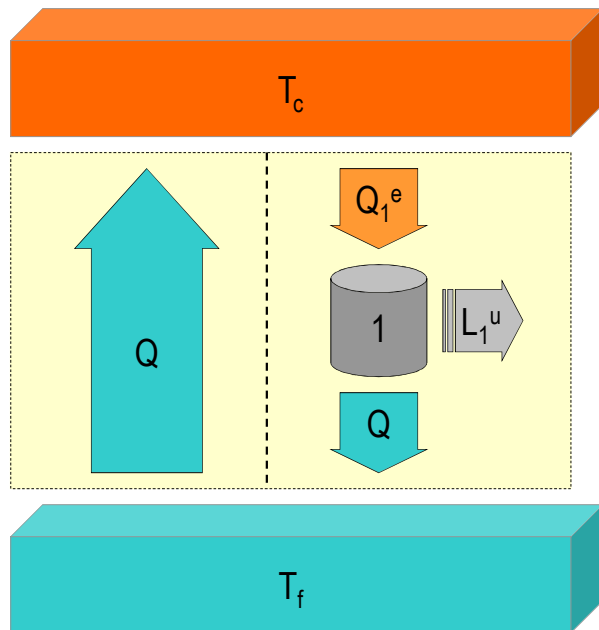


In altri termini, c'è un verso nelle trasformazioni energetiche, che non è naturalmente invertibile. Esiste quindi la «degradazione» dell'energia.



EQUIVALENZA ENUNCIATI II° PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA

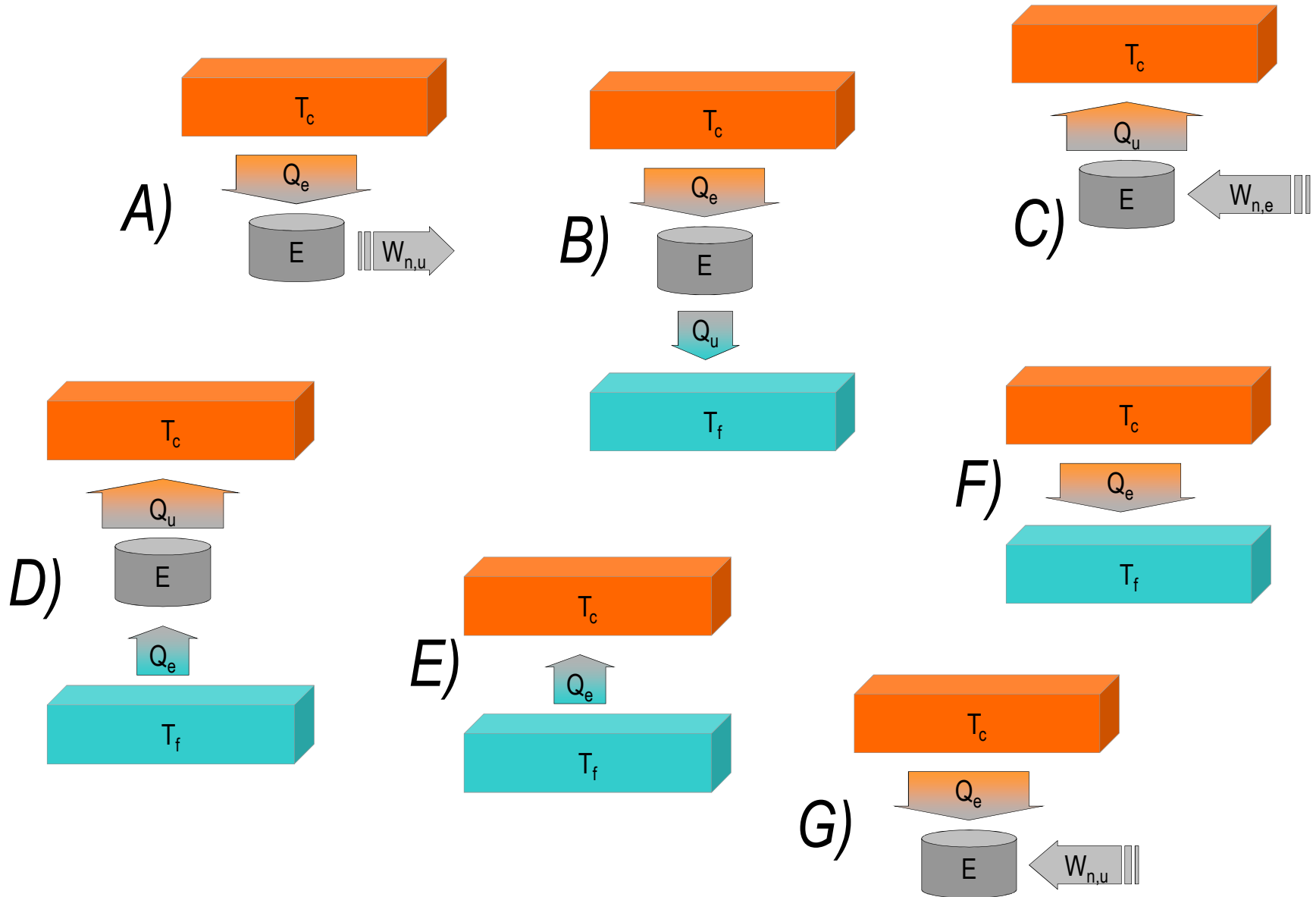
Considerando assieme le due macchine, diviene un sistema a lavoro nullo che trasferisce ciclicamente una quantità di calore da un pozzo ad una sorgente. Negando Kelvin-Planck, contraddico Clausius



Nell'insieme, diviene un sistema che trasforma integralmente in lavoro una quantità di calore assorbita.

Negando Clausius, contraddico Kelvin-Planck

Possible or not?



TEOREMI DI CARNOT

I TEOREMA

Il rendimento termodinamico di una macchina irreversibile è sempre inferiore a quello di una reversibile che operi tra le medesime riserve di calore



II TEOREMA

Il rendimento termodinamico è uguale per tutti le macchine termiche che operino reversibilmente tra le medesime riserve di calore

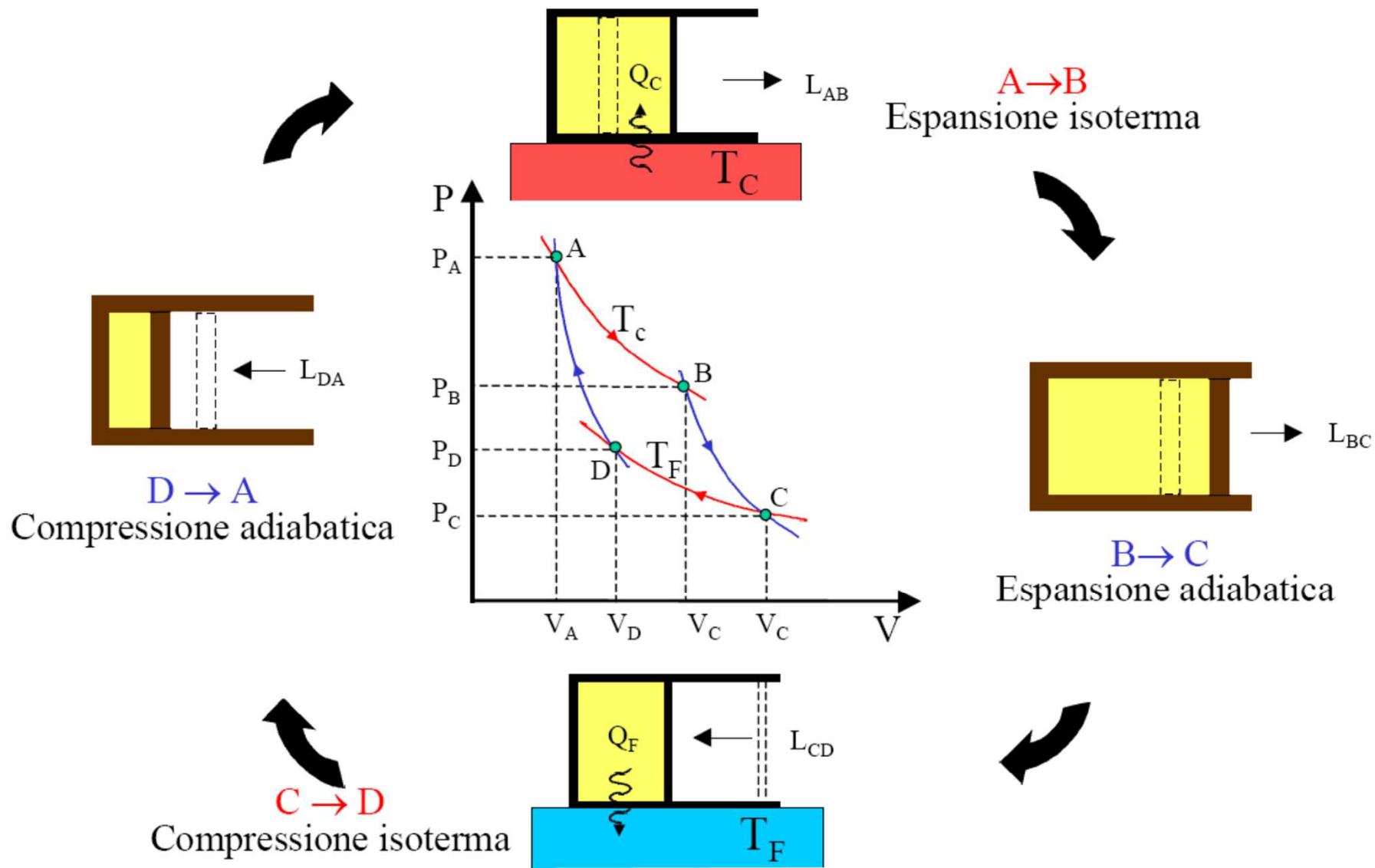
III TEOREMA

Il rendimento termodinamico reversibile è il massimo rendimento possibile a parità di riserve di calore



Quindi, fissate due riserve termiche, potendo stimare il rendimento termico di una macchina reversibile, conosco il massimo rendimento attuabile e quindi il massimo lavoro teorico sviluppabile.

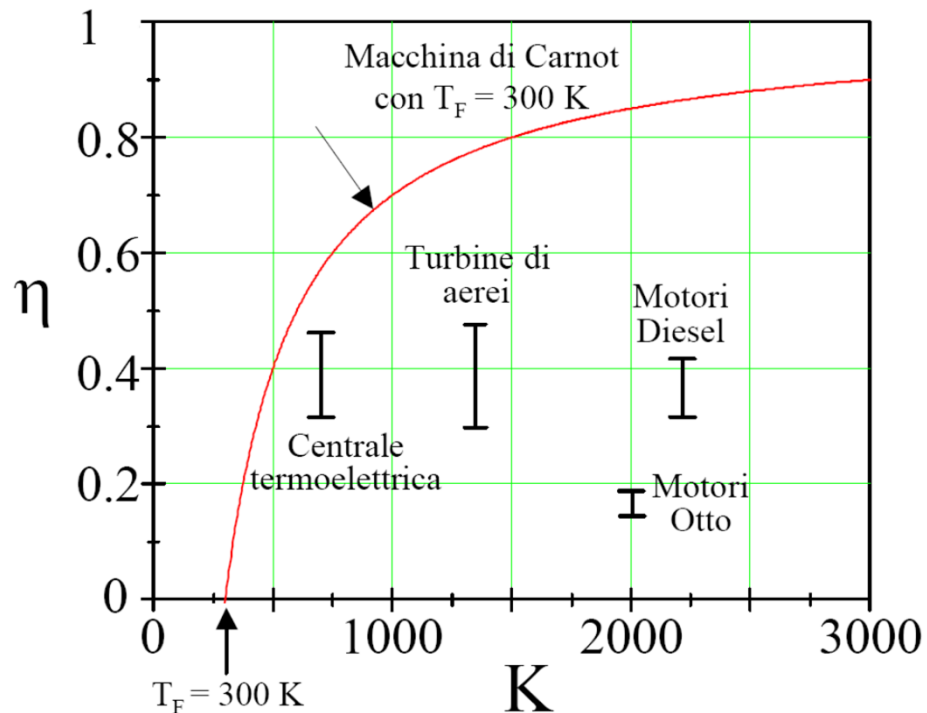
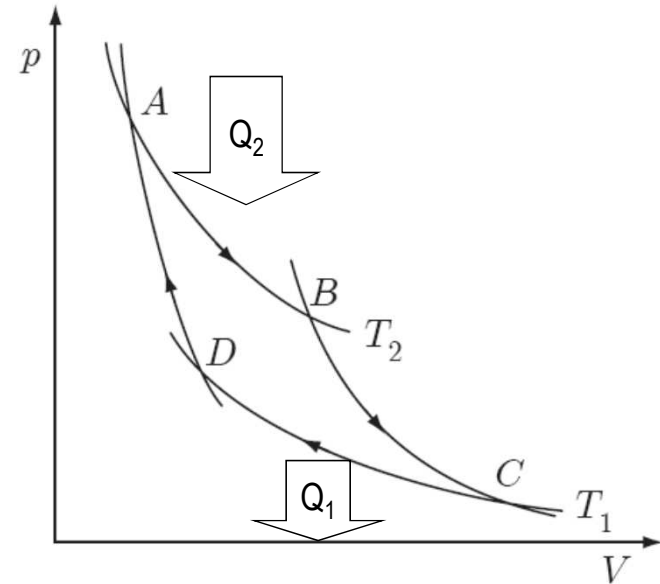
CICLO DI CARNOT



CICLO DI CARNOT

Si dimostra che per il ciclo di Carnot, il rendimento termico vale:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad \text{Reversibilità!}$$



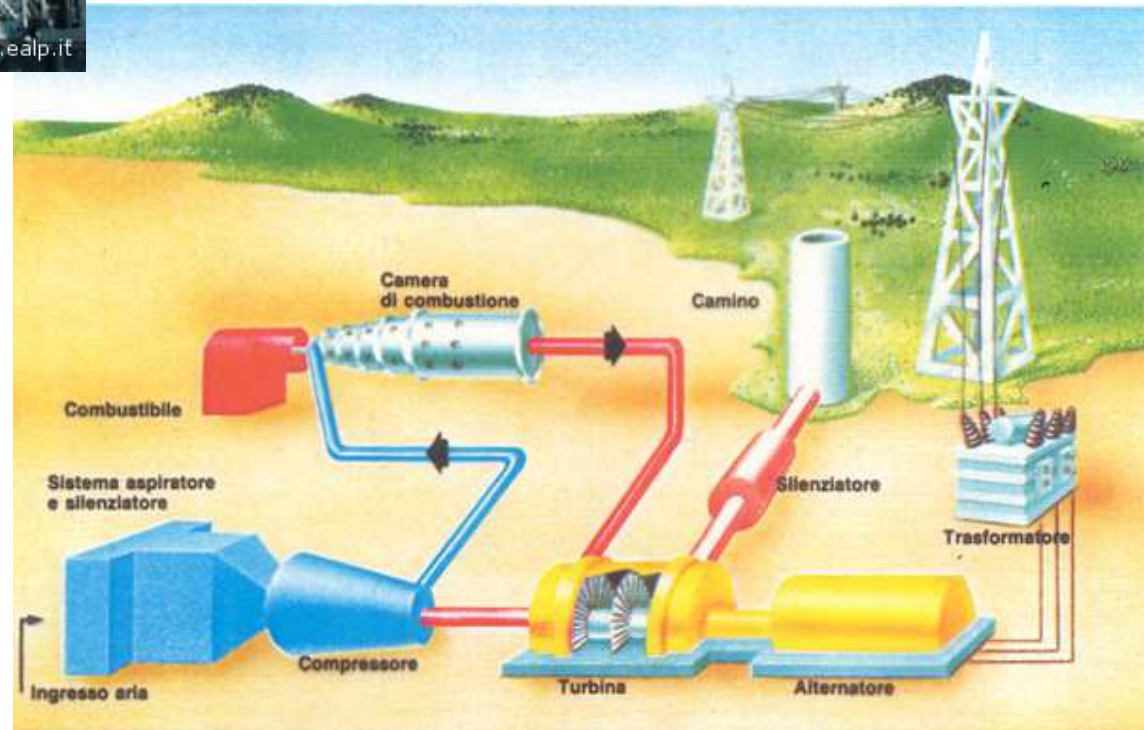
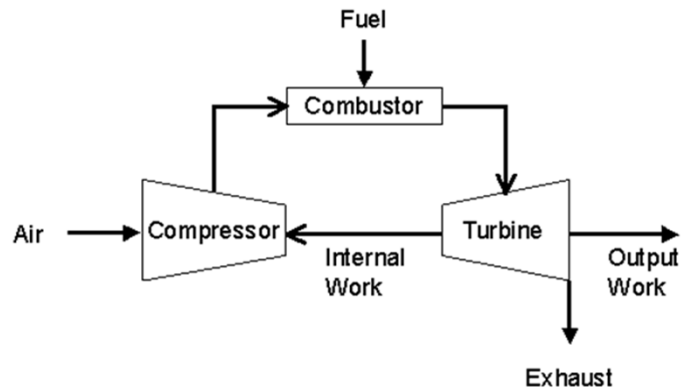
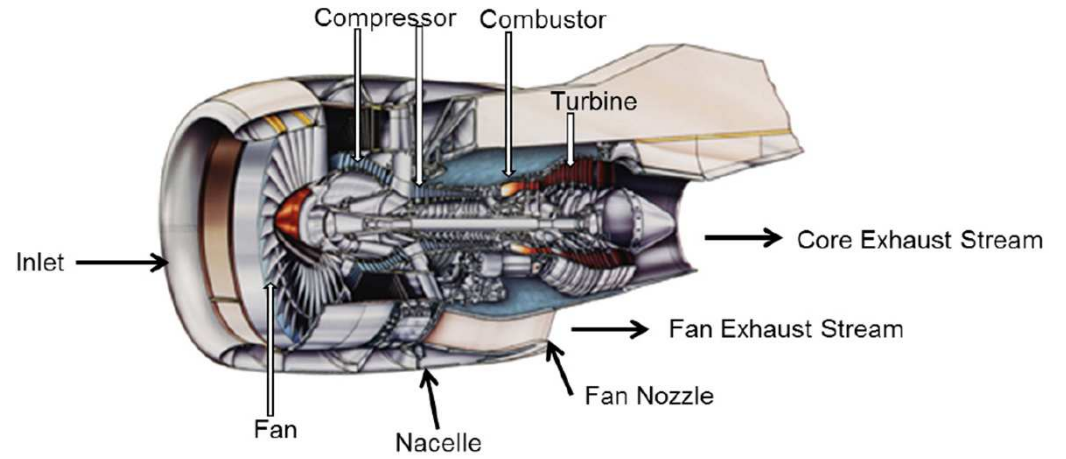
Dalla definizione di rendimento termico:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{Q_1}{Q_2}$$

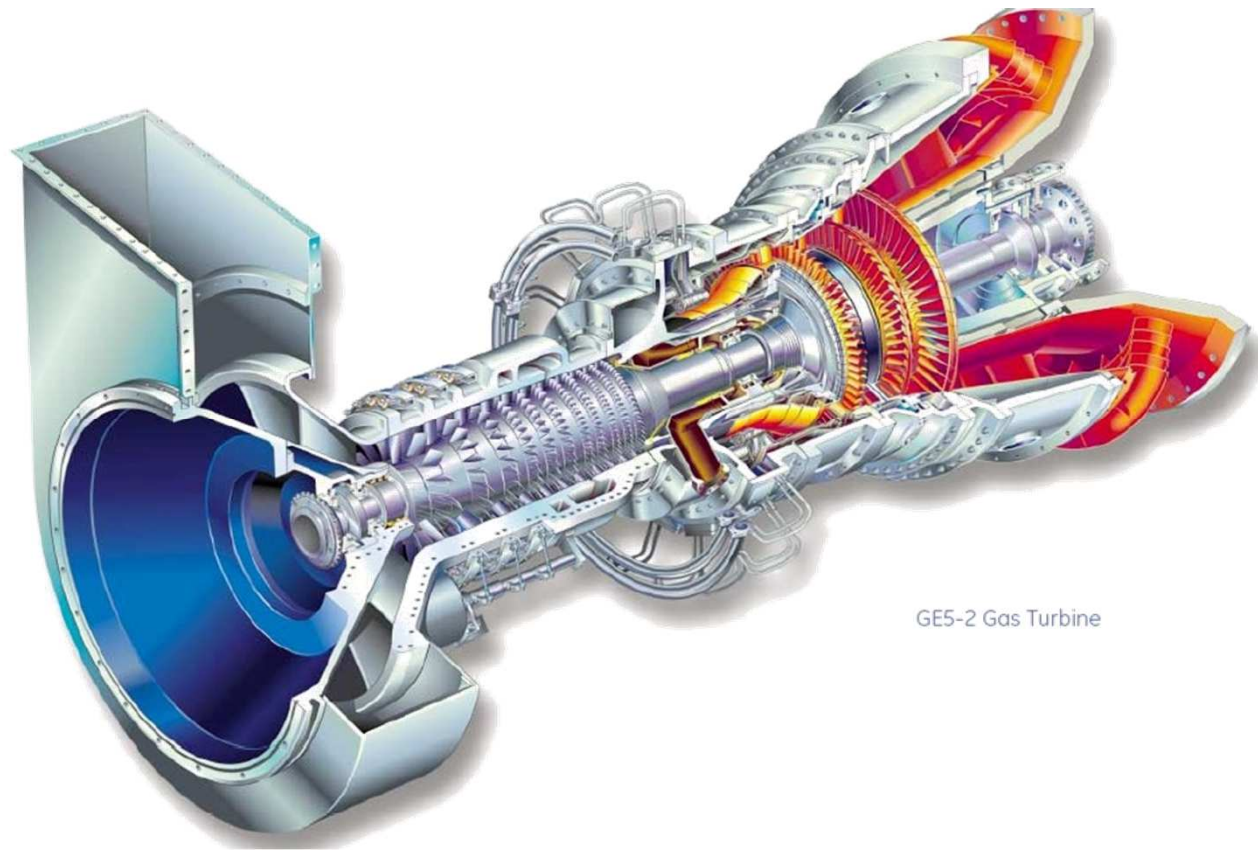
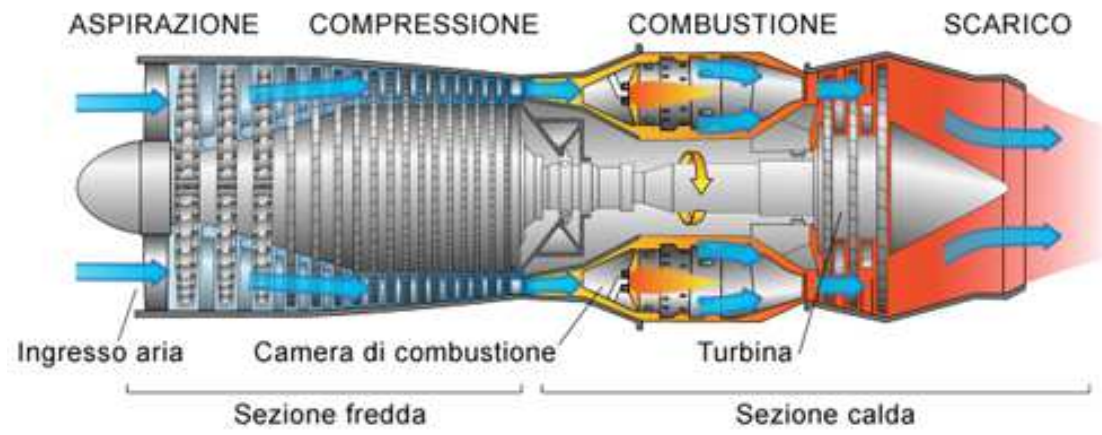
quindi:

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}$$

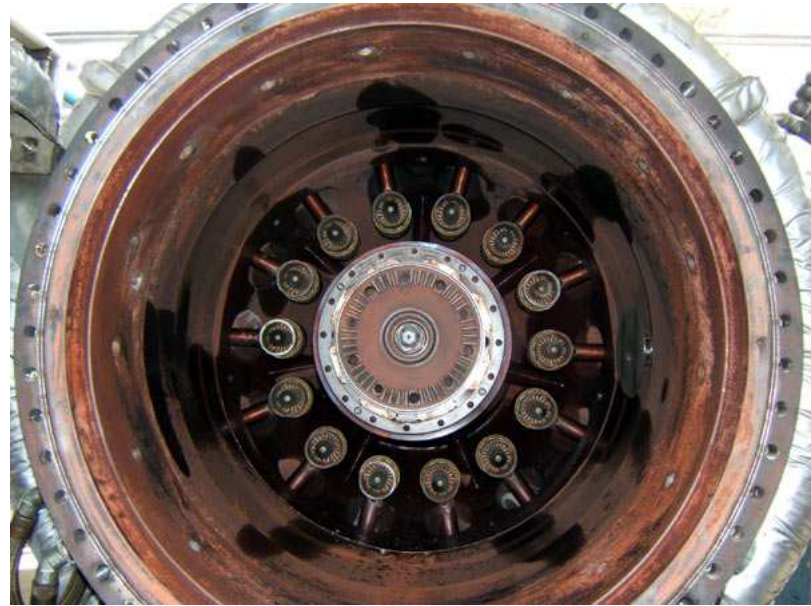
Ciclo BRAYTON



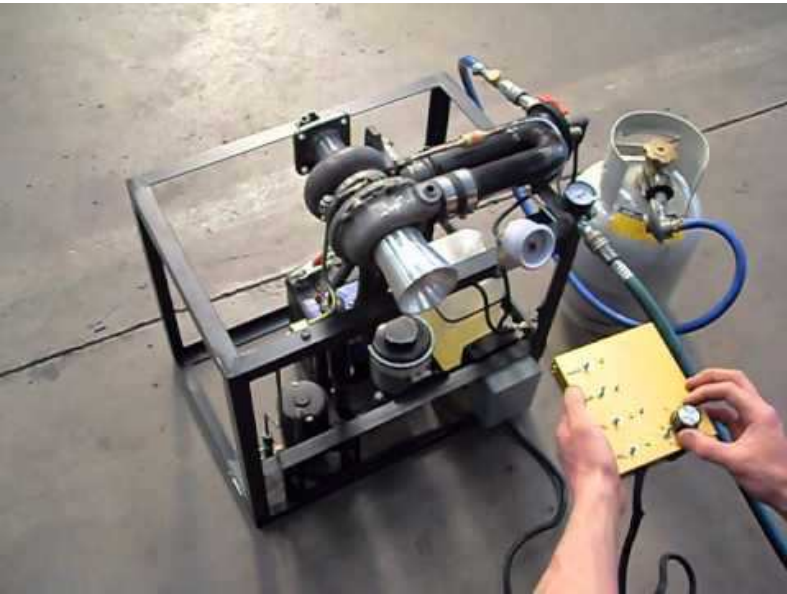
Ciclo BRAYTON



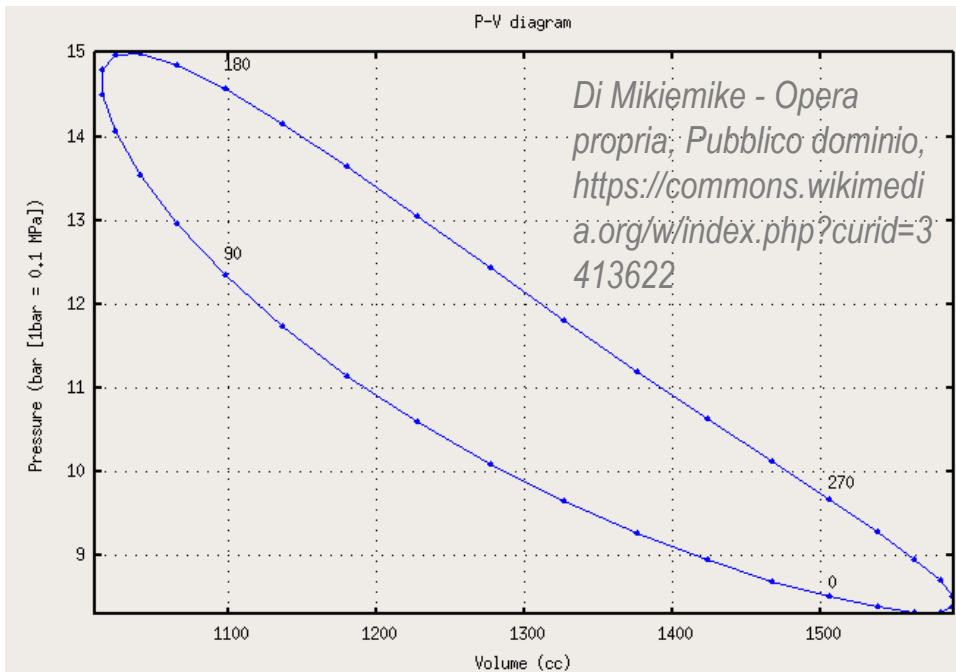
Ciclo BRAYTON

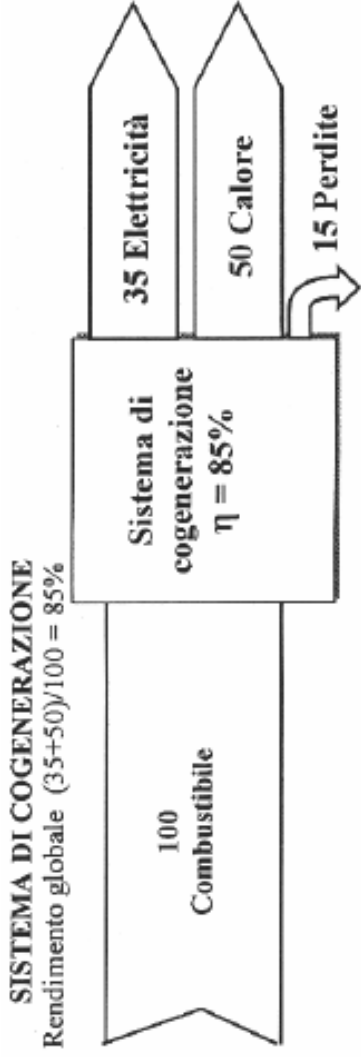
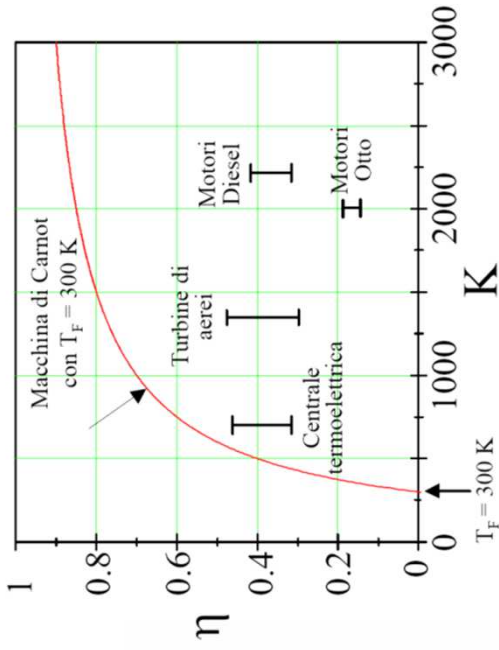


Ciclo BRAYTON



Ciclo STIRLING



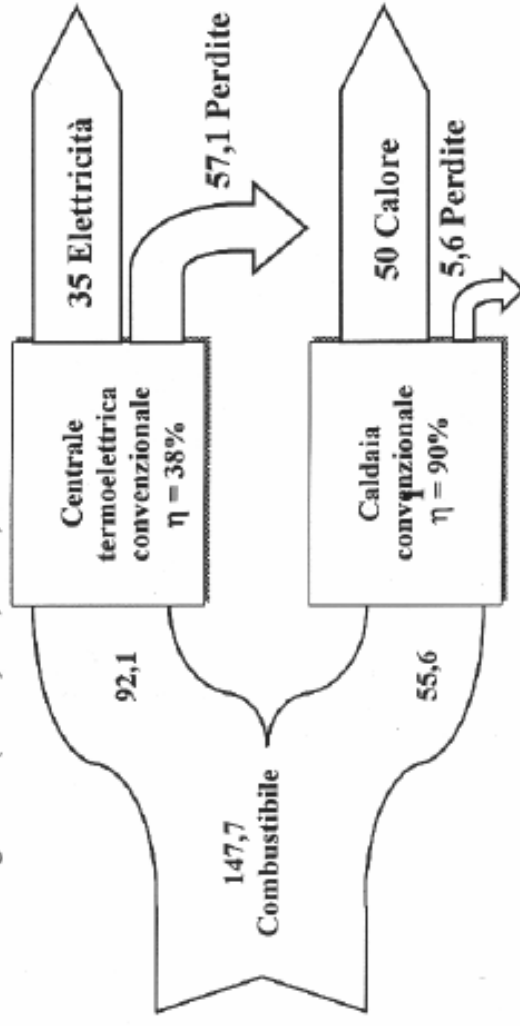


PRODUZIONE CONVENZIONALE SEPARATA

Rendimento elettrico netto medio centrale termoelettrica convenzionale 39%

Rendimento termico caldaia 90%

Rendimento globale $(35+50)/147,7 = 57,5\%$

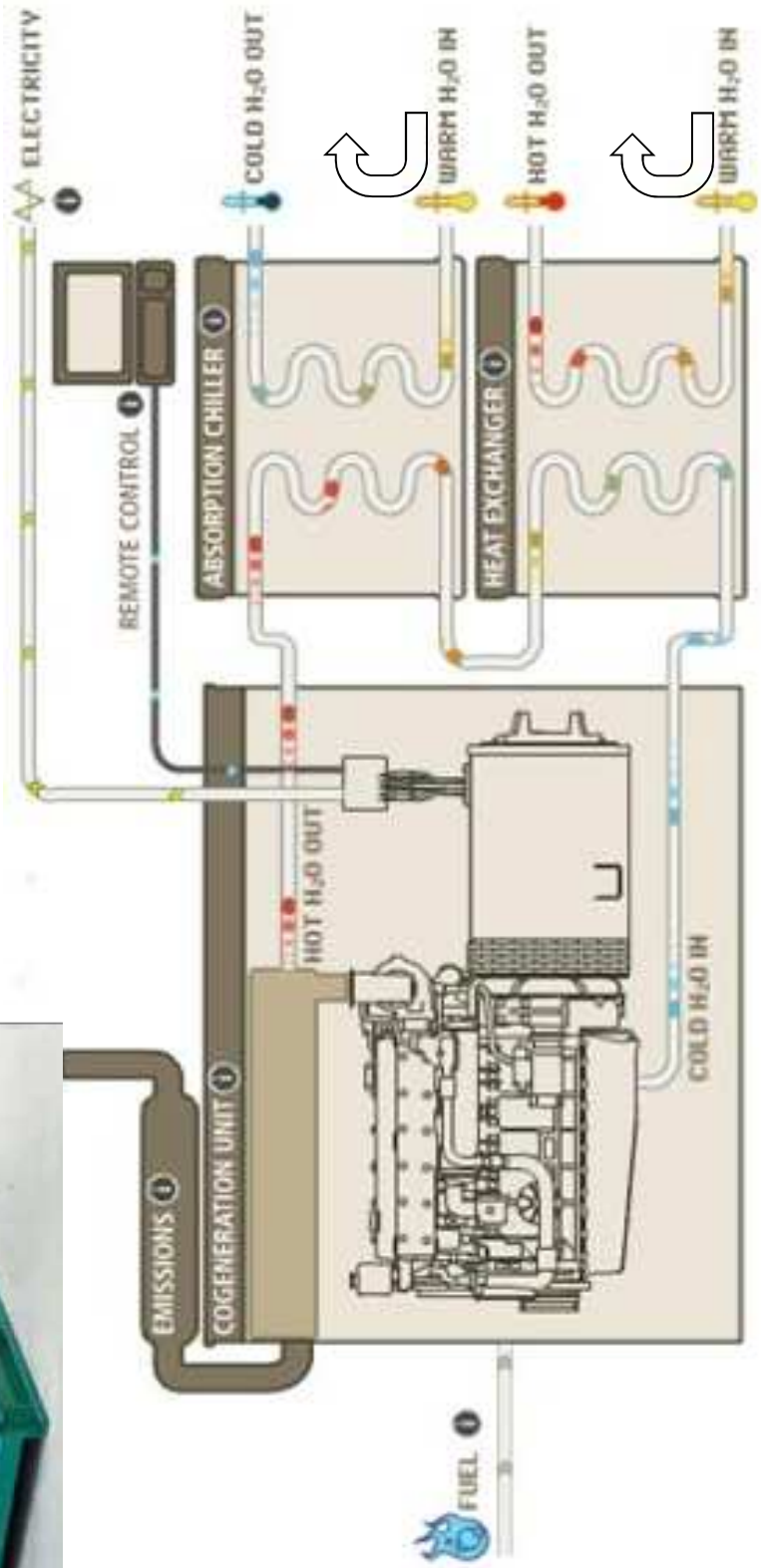




	HONDA ECOWILL	SENERTEC DACHS
Cilindrata cc	163	579
Potenza elettrica kW	1.0	5.5
Potenza termica kW	3.25	12.5
Caldaia ausiliaria kW	14.0	30
Tmax acqua °C	80	95
Rendimento elettrico	20%	27%
Rendimento termico	65%	61%
Rendimento globale	85%	88%
Rumore dB	44	52
Ingombri mm	580*380*880	1060*720*1000
Peso kg	257	520

	DOMESTIC	SMALL COMMERCIAL
Electrical Output	240V 50Hz, 110V 60Hz	240V 50Hz, 110V 60Hz
Electrical Power, kWe	2.5	10
Heating Power, kW	11 (22 boost mode)	44
Overall Efficiency	90%	90%
Weight, kg	60	175
Dimensions, mm	870h x 600w x 400d	960h x 800w x 600d

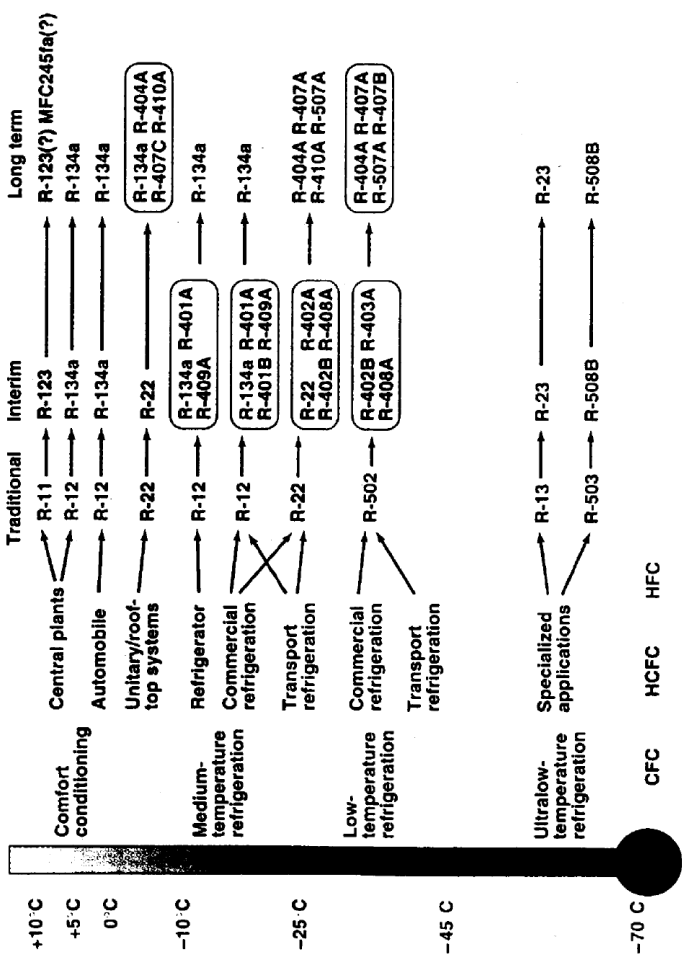
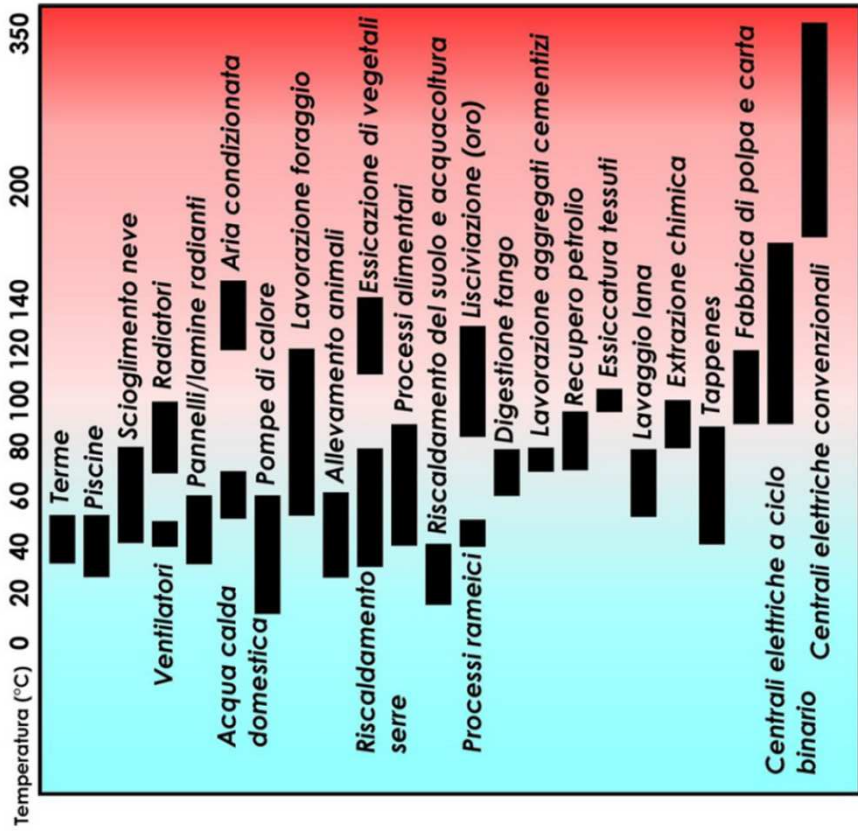
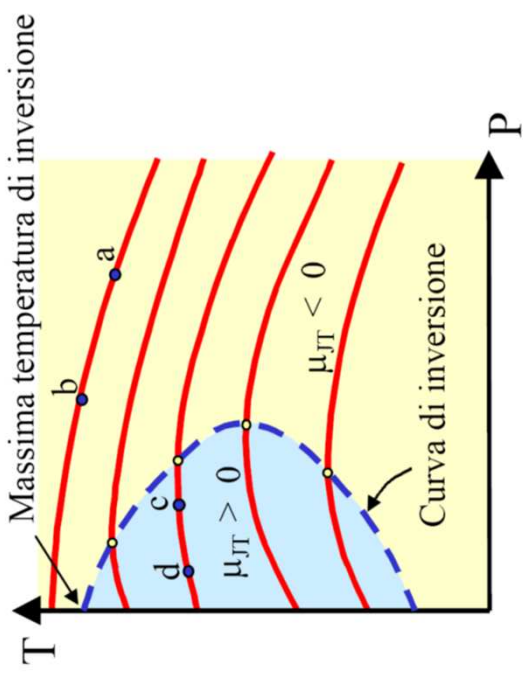




*How for
cooling*



$$\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_H = \frac{2a}{RT} - \frac{b}{C_p}$$



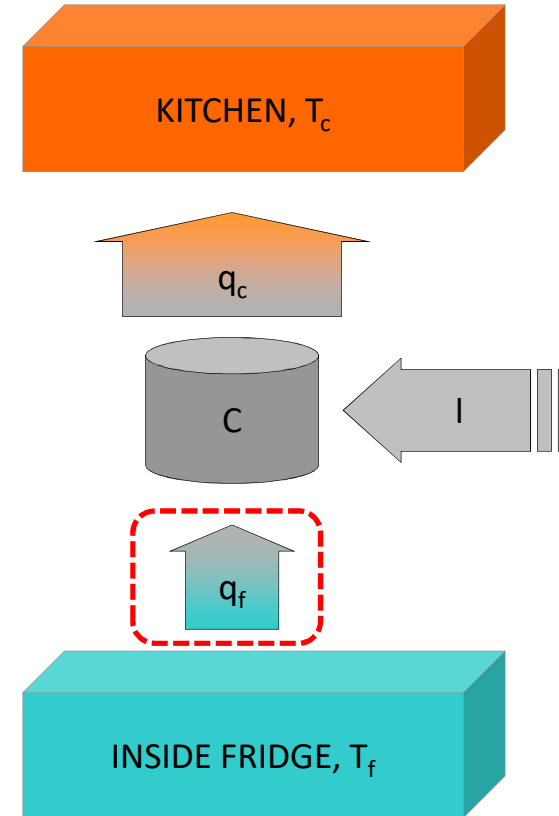
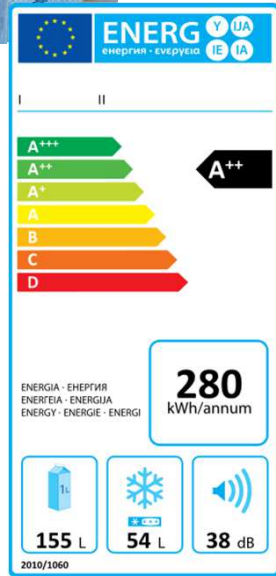
FRIDGE



$$COP = \frac{q_f}{l} = \frac{q_f}{q_c - q_f}$$

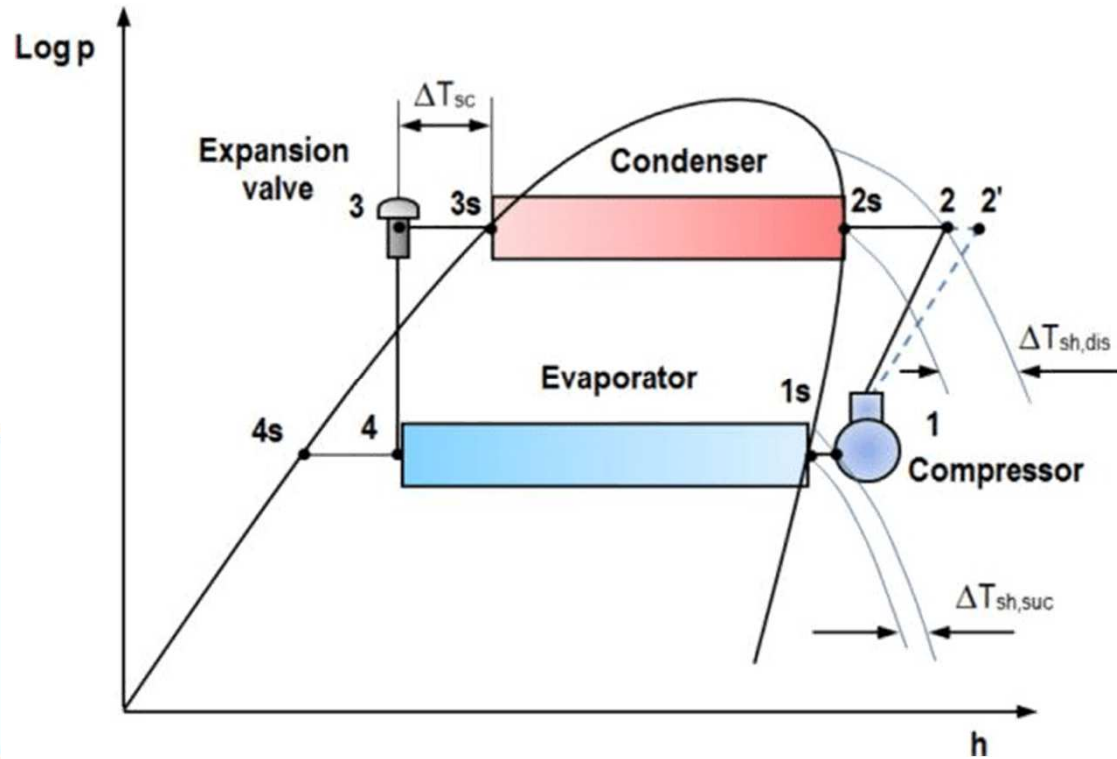
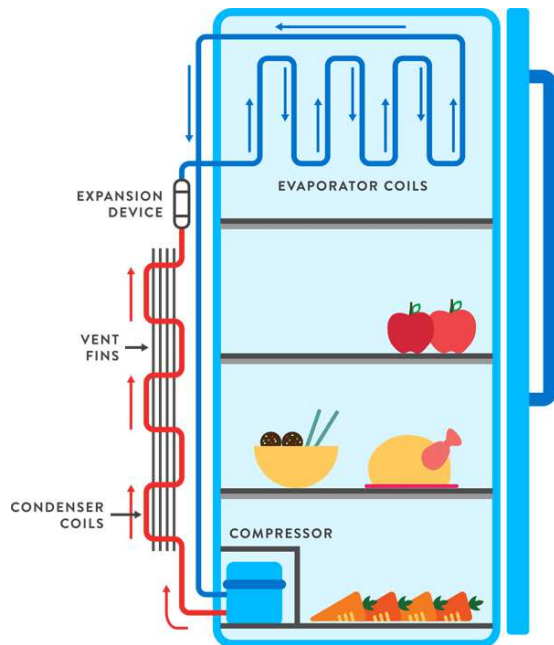
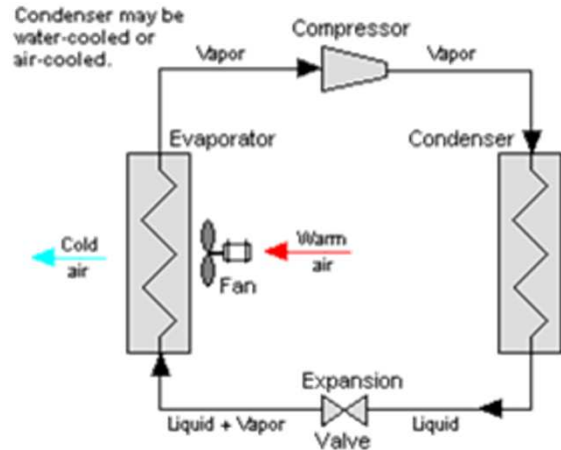
$$COP \cdot (q_c - q_f) = q_f$$

$$q_c = q_f \cdot \frac{COP + 1}{COP}$$



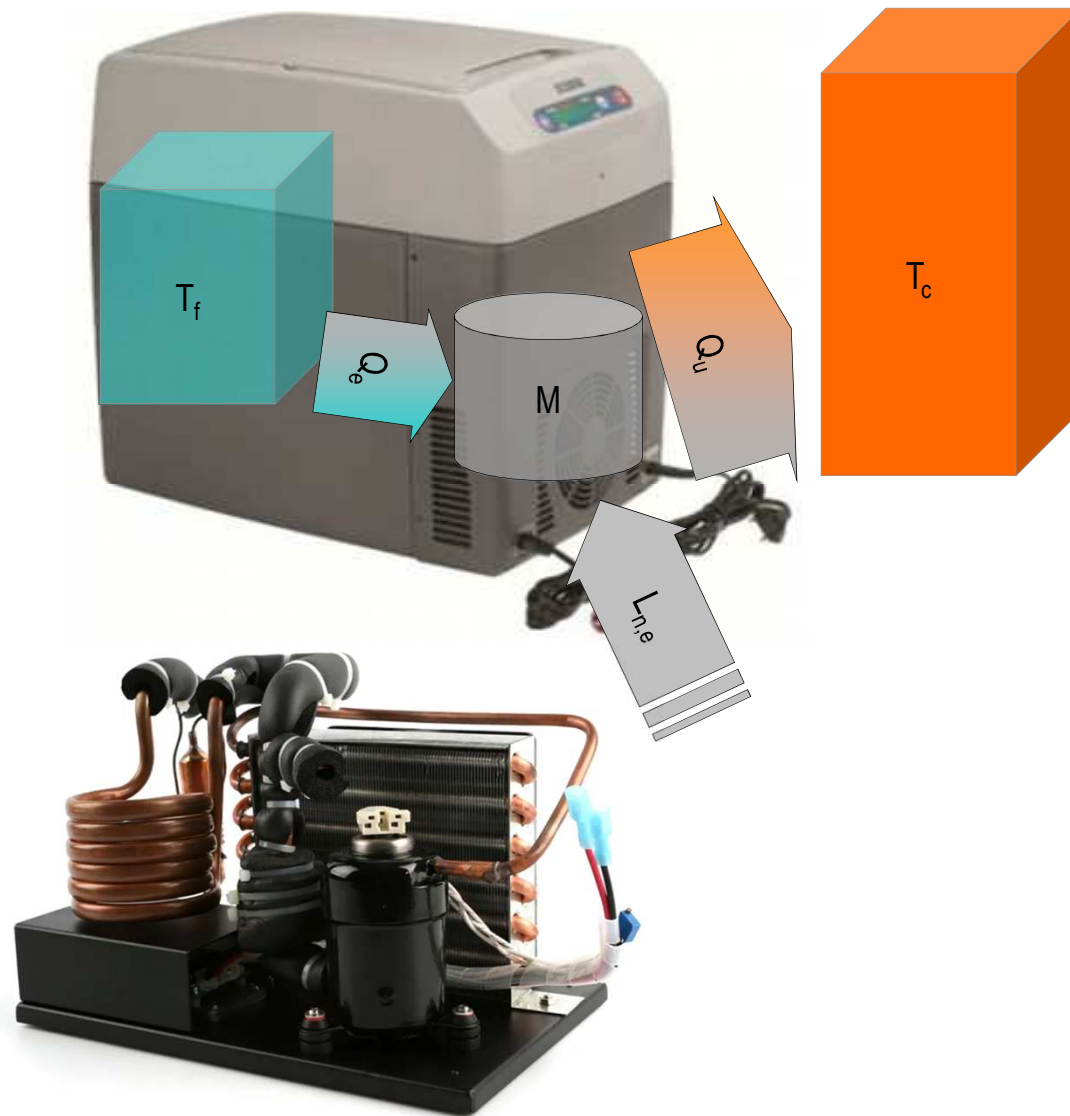
FRIDGE

(single-stage vapour compression refrigeration)



FRIDGE

(single-stage vapour compression refrigeration)



CAPACITA' (WATT)

R134a

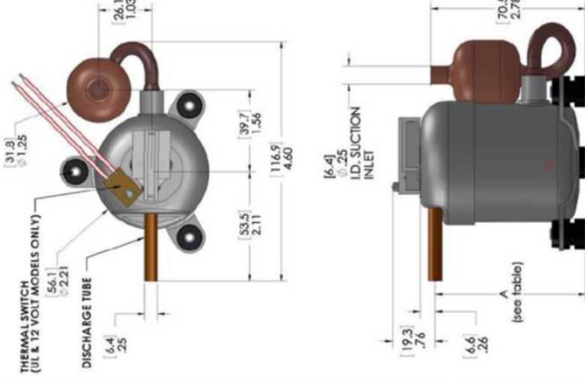
TEMPERATURA DI CONDENSAZIONE (°C)	VELOCITA' COMPRESSORE (RPM)	TEMPERATURA DI EVAPORAZIONE (°C)						
		-12	-7	-1	+4	+10	+15	+21
+38	3000	72	114	156	213	270	346	422
	4000	101	155	209	283	356	454	552
	4500	115	175	235	317	400	508	617
	5000	129	194	260	349	439	558	677
	6000	156	232	309	414	518	657	796
TEMPERATURA DI CONDENSAZIONE (°C)	VELOCITA' COMPRESSORE (RPM)	TEMPERATURA DI EVAPORAZIONE (°C)						
		-12	-7	-1	+4	+10	+15	+21
+49	3000	58	96	135	188	240	310	380
	4000	91	140	188	254	320	407	495
	4500	108	161	215	287	360	456	552
	5000	121	178	236	314	392	497	602
	6000	147	212	278	368	457	580	703
TEMPERATURA DI CONDENSAZIONE (°C)	VELOCITA' COMPRESSORE (RPM)	TEMPERATURA DI EVAPORAZIONE (°C)						
		-12	-7	-1	+4	+10	+15	+21
+60	3000	43	78	114	162	211	275	339
	4000	76	119	162	222	281	360	438
	4500	92	139	187	252	316	402	488
	5000	104	154	204	271	339	429	519
	6000	129	183	237	311	386	484	582

POTENZA ASSORBITA (WATT)

R134a

TEMPERATURA DI CONDENSAZIONE (°C)	VELOCITA' COMPRESSORE (RPM)	TEMPERATURA DI EVAPORAZIONE (°C)						
		-12	-7	-1	+4	+10	+15	+21
+38	3000	77	64	60	57	55	54	53
	4000	89	82	78	76	75	74	73
	4500	93	89	87	86	85	85	84
	5000	99	99	98	98	98	98	98
	6000	109	117	121	124	126	128	126
TEMPERATURA DI CONDENSAZIONE (°C)	VELOCITA' COMPRESSORE (RPM)	TEMPERATURA DI EVAPORAZIONE (°C)						
		-12	-7	-1	+4	+10	+15	+21
+49	3000	71	77	79	81	82	83	84
	4000	91	98	102	105	106	108	109
	4500	99	107	112	115	118	120	122
	5000	108	118	124	129	132	134	136
	6000	125	139	149	157	162	165	168
TEMPERATURA DI CONDENSAZIONE (°C)	VELOCITA' COMPRESSORE (RPM)	TEMPERATURA DI EVAPORAZIONE (°C)						
		-12	-7	-1	+4	+10	+15	+21
+60	3000	74	93	103	111	115	119	122
	4000	100	118	129	138	144	149	152
	4500	109	128	139	150	157	163	167
	5000	123	141	153	164	171	178	183
	6000	149	169	182	195	203	211	216

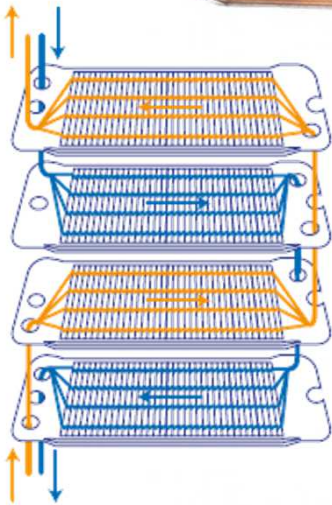
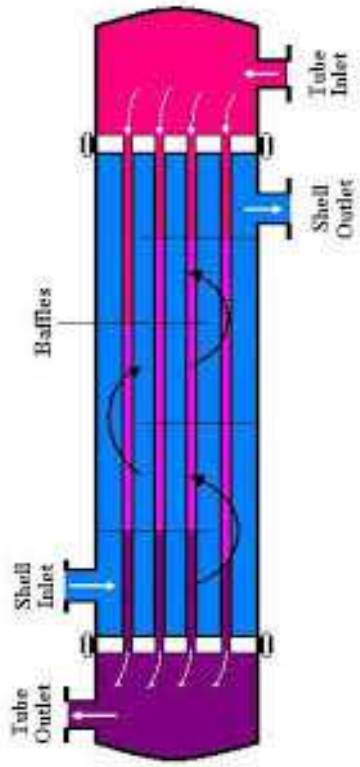
Refrigerante	HFC-R134a / R404A
Lubrificante	POE RL 68H
Quantità di olio	21 cc
Motore	Brushless DC
Alimentazione	24 Vdc (nominali)
Range Alimentazione	20...30 Vdc
Corrente massima	9.5 Amps in continua
Cilindrata	1.9 cm ³
Velocità	Variabile
Range velocità	2100 – 6500 RPM
Peso	680 gr.
Range temperatura di evaporazione	-18°C / +24°C
Range temperatura di condensazione	+27°C / +71°C
Massima temp. di scarico	+130°C
Rapporto massimo di compressione	8:1
Massima temp. ambiente	+54°C
Ø aspirazione	8 mm (esterno)
Ø mandata	6 mm (esterno)
Alimentazione analogica	0 – 0.6 Vdc = OFF
Comando lineare velocità	0.7 Vdc = ~ 2100 RPM 4.5 Vdc = ~ 6500 RPM
Dimensioni scheda elettronica	38.1 x 63.5 mm
Peso scheda elettronica	28 gr.
Materiale dissipatore	Alluminio anodizzato
Dimensioni dissipatore	46,36 x 82,55 mm
Peso dissipatore	39 gr.

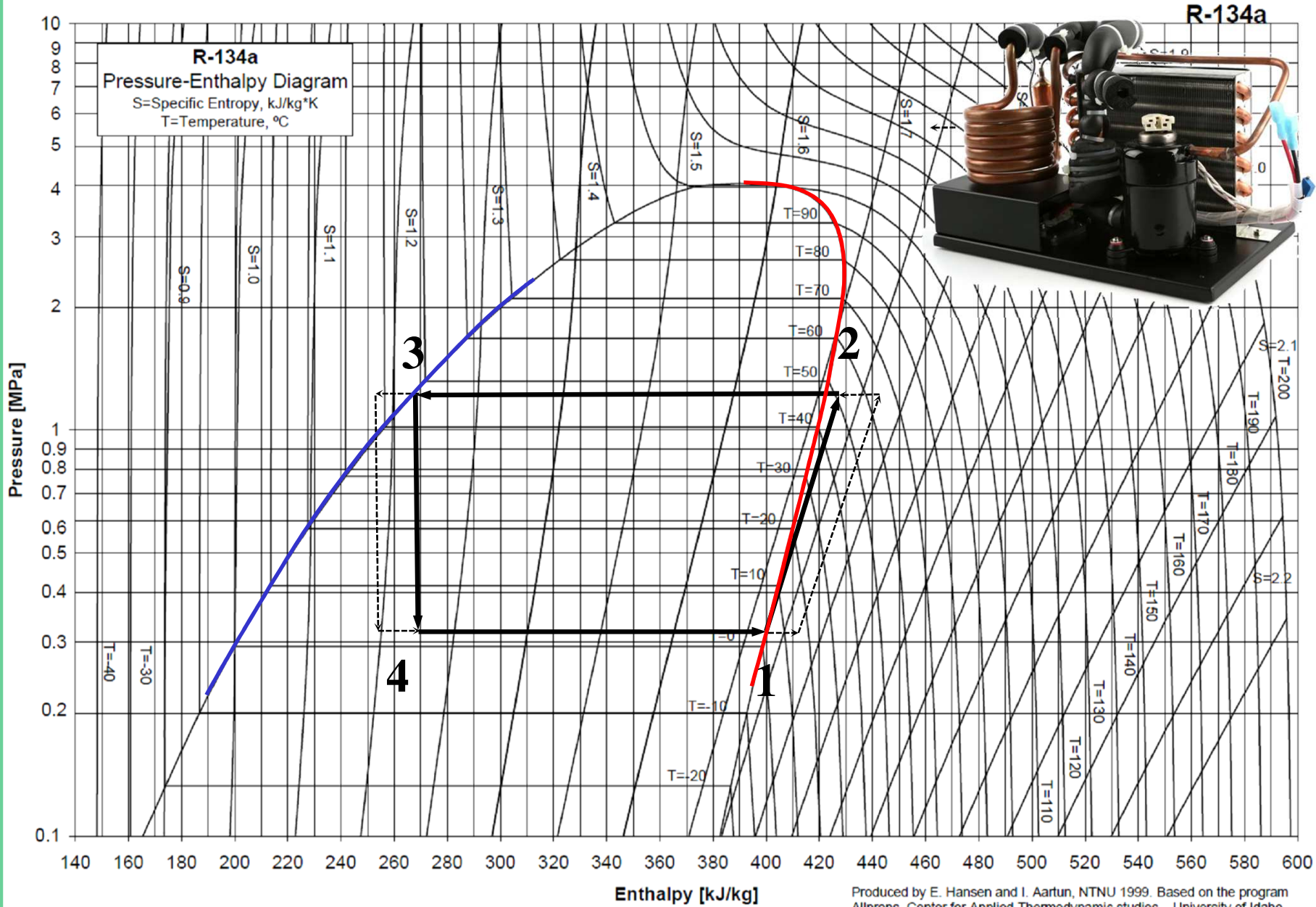


C.O.P. (W/W)

R134a

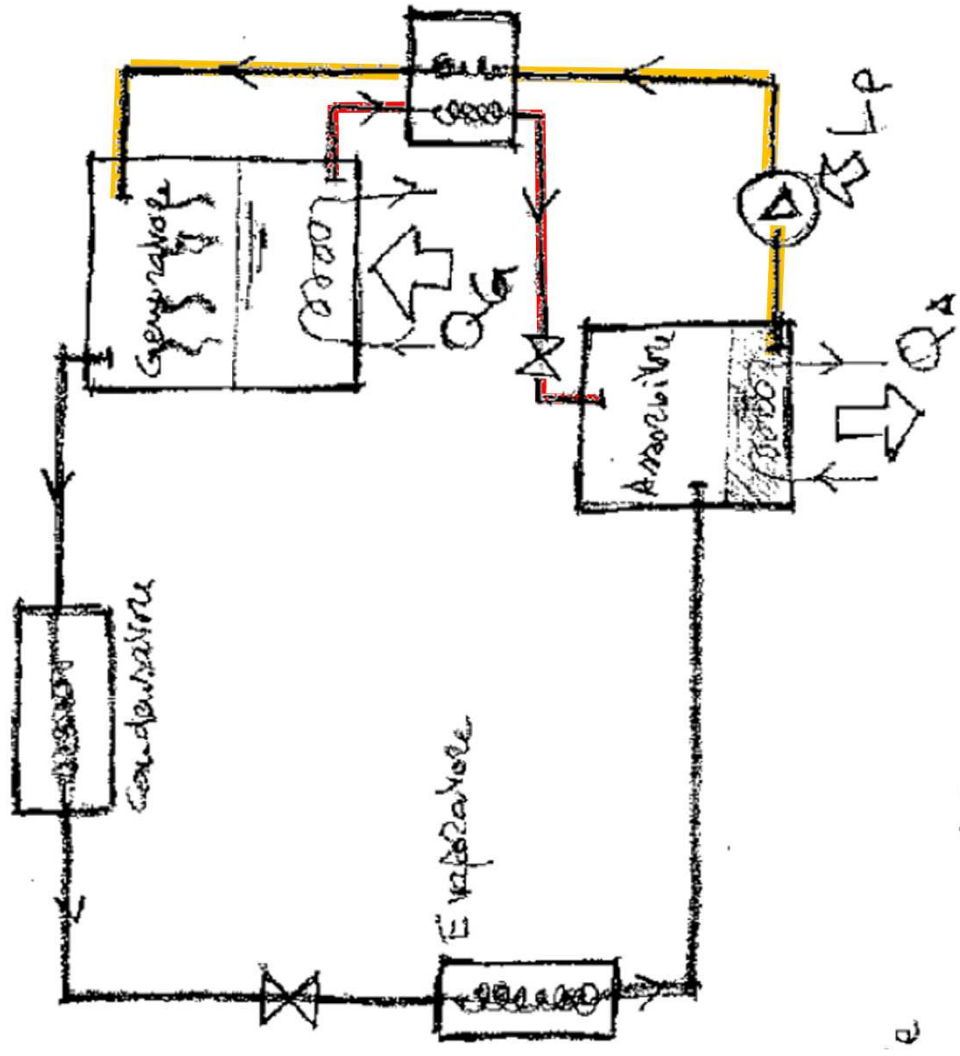
TEMPERATURA DI CONDENSAZIONE (°C)	VELOCITA' COMPRESSORE (RPM)	TEMPERATURA DI EVAPORAZIONE (°C)						
		-12	-7	-1	+4	+10	+15	+21
+38	3000	0.93	1.77	2.61	3.76	4.91	6.43	7.96
	4000	1.13	1.90	2.66	3.71	4.76	6.14	7.53
	4500	1.23	1.96	2.69	3.68	4.68	6.00	7.31
	5000	1.30	1.97	2.65	3.57	4.49	5.71	6.93
	6000	1.42	1.99	2.56	3.34	4.11	5.14	6.17
TEMPERATURA DI CONDENSAZIONE (°C)	VELOCITA' COMPRESSORE (RPM)	TEMPERATURA DI EVAPORAZIONE (°C)						
		-12	-7	-1	+4	+10	+15	+21
+49	3000	0.81	1.26	1.70	2.32	2.93	3.74	4.55
	4000	1.00	1.43	1.85	2.43	3.01	3.78	4.54
	4500	1.10	1.51	1.92	2.49	3.05	3.79	4.54
	5000	1.12	1.52	1.91	2.44	2.97	3.70	4.42
	6000	1.17	1.52	1.87	2.35	2.82	3.50	4.19
TEMPERATURA DI CONDENSAZIONE (°C)	VELOCITA' COMPRESSORE (RPM)	TEMPERATURA DI EVAPORAZIONE (°C)						
		-12	-7	-1	+4	+10	+15	+21
+60	3000	0.58	0.84	1.11	1.47	1.83	2.30	2.78
	4000	0.75	1.01	1.26	1.61	1.96	2.42	2.87
	4500	0.84	1.09	1.34	1.68	2.02	2.47	2.92
	5000	0.85	1.09	1.33	1.65	1.98	2.41	2.84
	6000	0.87	1.08	1.30	1.60	1.90	2.29	2.69





Produced by E. Hansen and I. Aartun, NTNU 1999. Based on the program Allprops, Center for Applied Thermodynamic studies, University of Idaho.

Q_c ↑

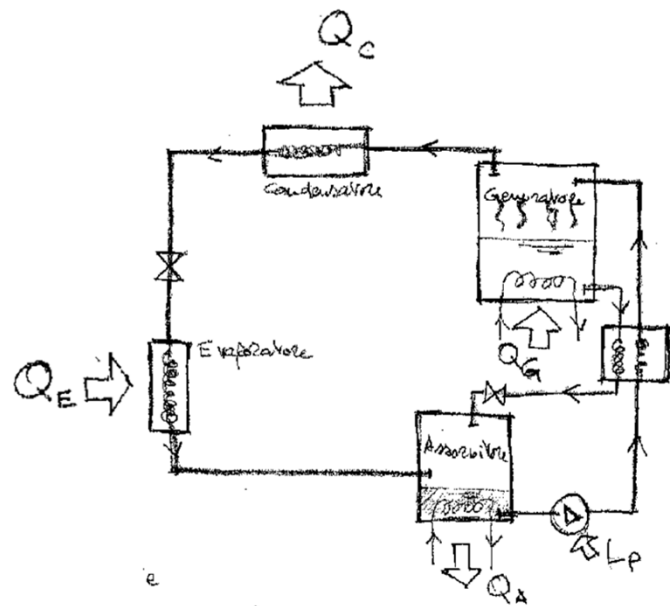


- soluto
- miscela
- solvente

Generatore Termico

- soluto
- solvente
- Ammoniac - Acqua
- Acqua - Bevanito di Cl

Q_e ↑



COP da intendere
come EER

$$COP = \frac{Q_E}{Q_G + L_P} \approx \frac{Q_E}{Q_G}$$

Supponendo l'intero ciclo come isentropico :

1° principio

$$\frac{Q_E}{T_E} + \frac{Q_G}{T_G} = \frac{Q_C + Q_A}{T_{amb}} \quad \text{ma} \quad Q_C + Q_A = Q_G + Q_E$$

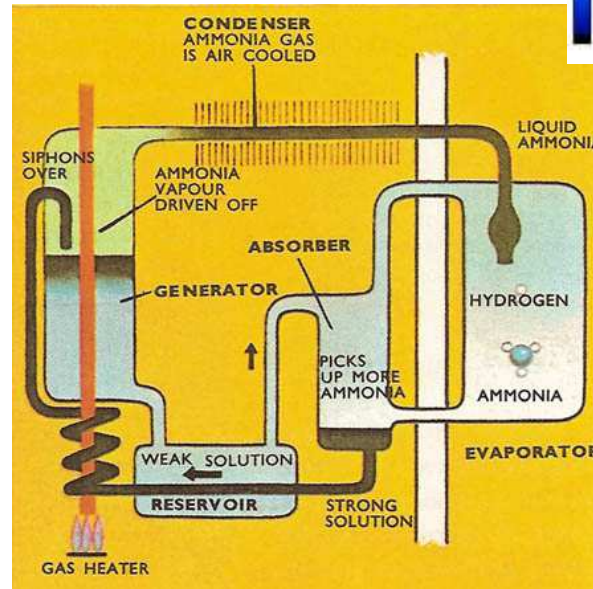
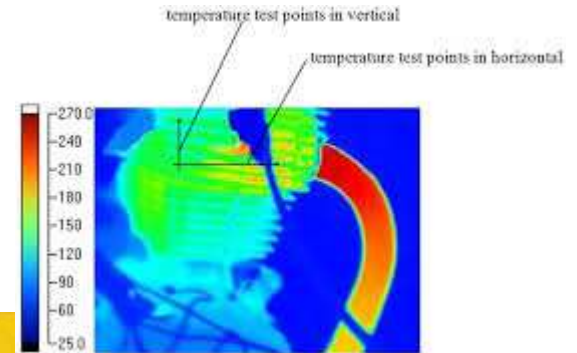
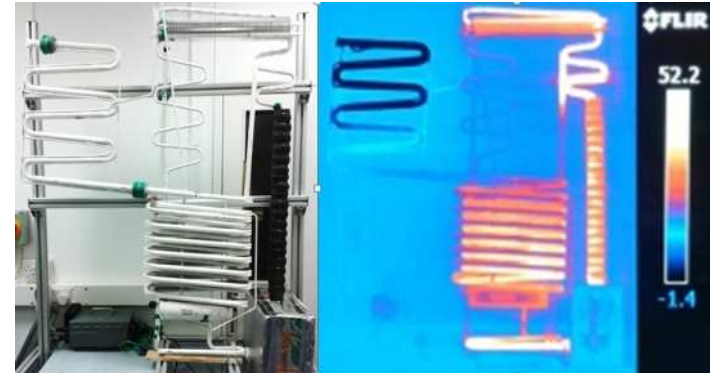
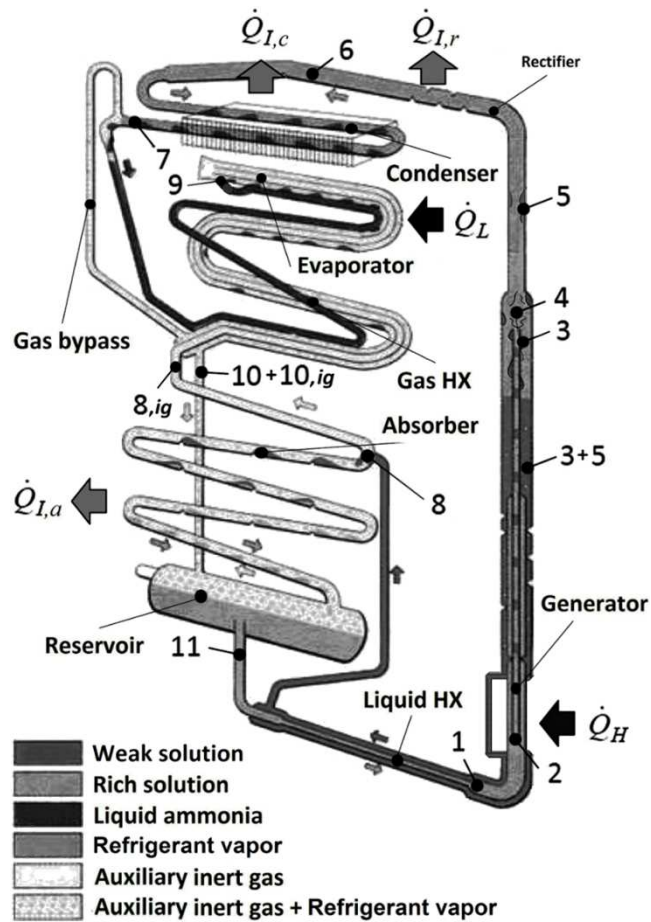
$$\Rightarrow \frac{1}{T_E} \frac{Q_E}{Q_G} + \frac{1}{T_G} = \frac{1}{T_{amb}} + \frac{Q_E}{Q_G} \frac{1}{T_{amb}} < \frac{1}{T_{amb}}$$

quindi $\frac{Q_E}{Q_G} = \frac{\frac{1}{T_{amb}} - \frac{1}{T_G}}{\frac{1}{T_E} - \frac{1}{T_{amb}}} \approx COP$

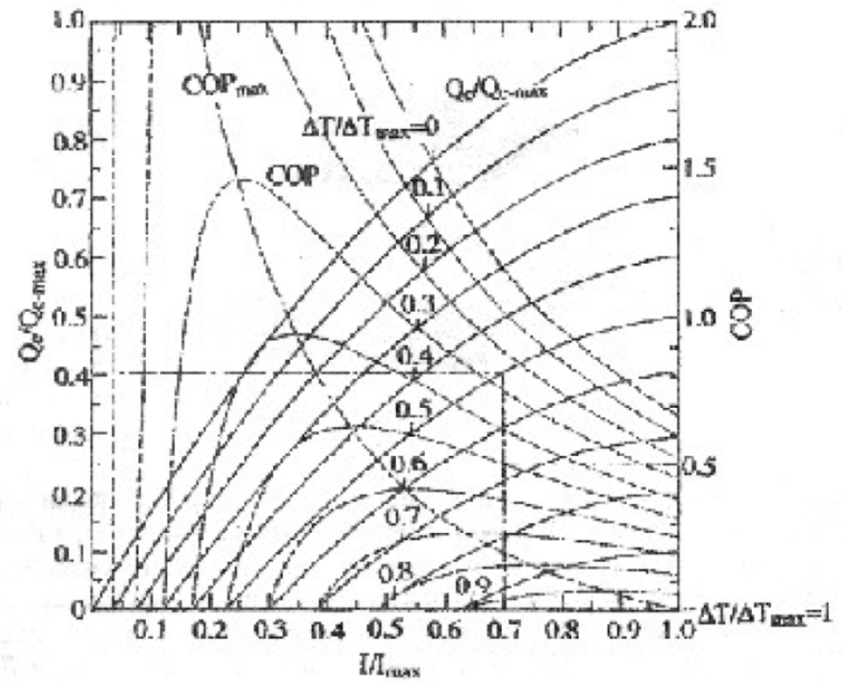
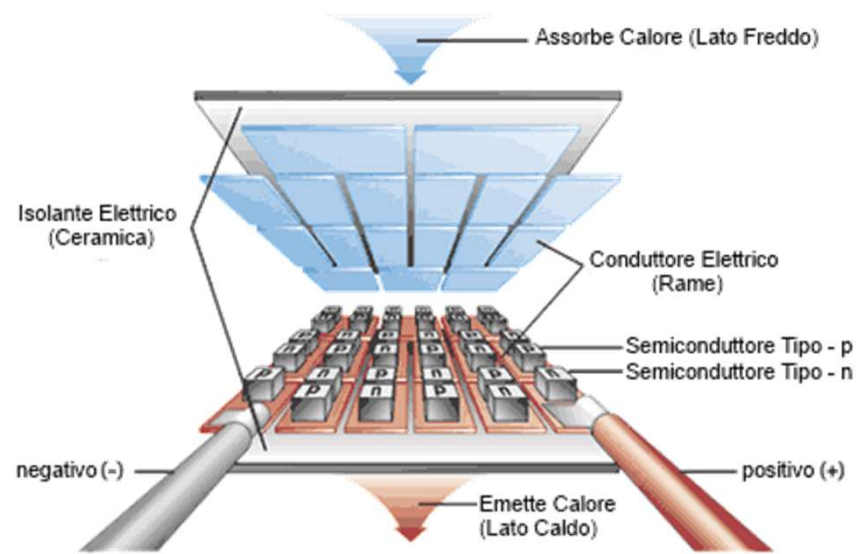
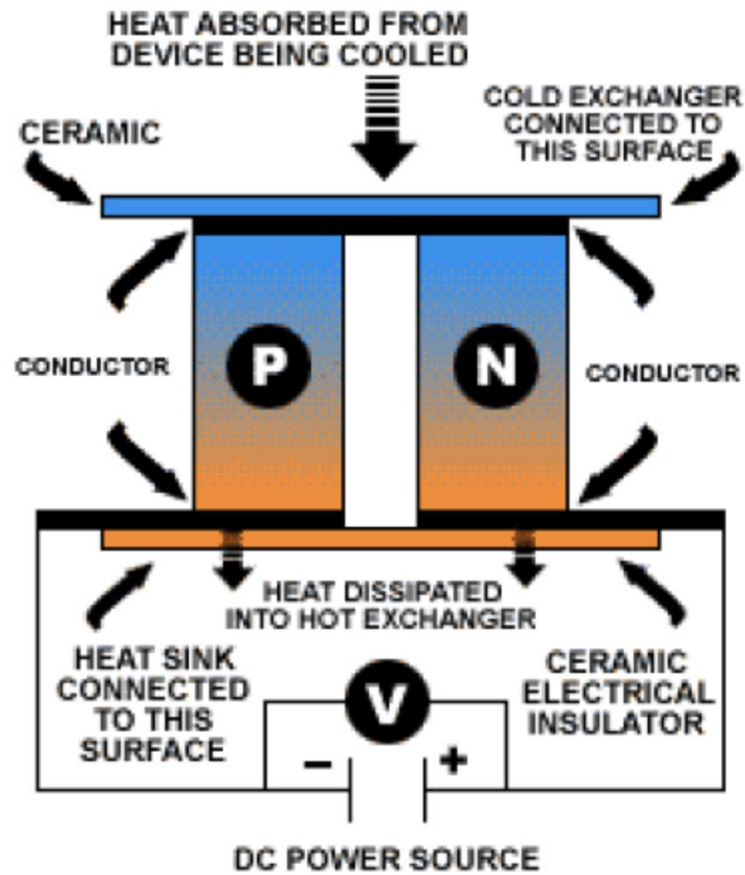
Se $T_G \rightarrow \infty$, $COP = \frac{\frac{1}{T_{amb}}}{\frac{1}{T_E} - \frac{1}{T_{amb}}} = COP_{carnot} \text{ tra } T_{amb} \text{ e } T_E$

FRIDGE

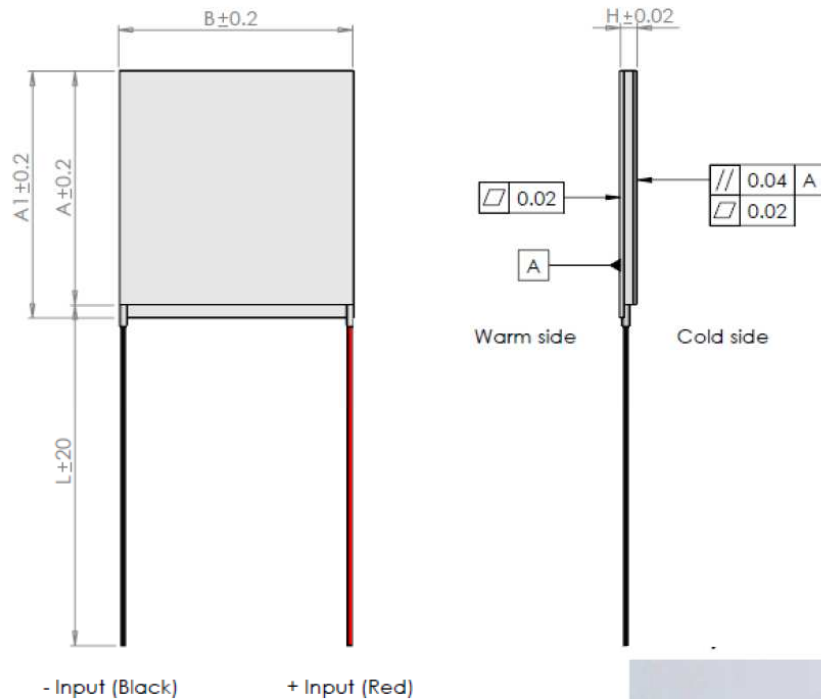
(Diffusion-Absorption Refrigerator)



THERMOELECTRIC REFRIGERATION



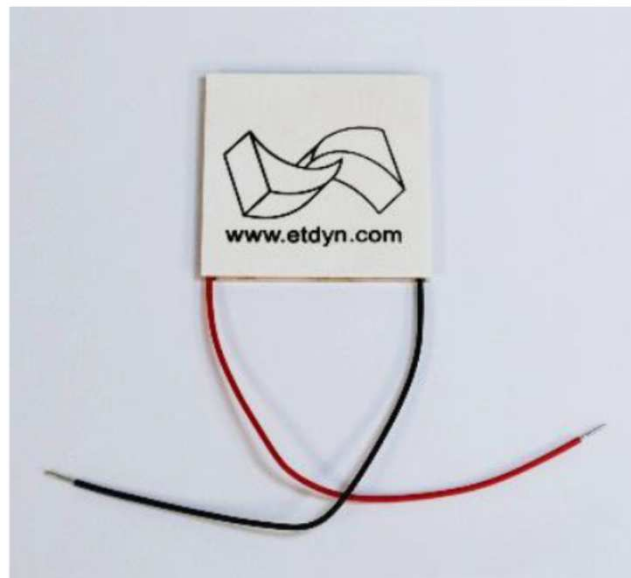
THERMOELECTRIC REFRIGERATION



I_{max}	[A]	2.2
V_{max}	[Vdc]	15.7
$P_c \text{ max}$	[W]	20.9
ΔT_{max}	[°C]	74
A	[mm]	25
A1	[mm]	25
B	[mm]	25
H	[mm]	3.8
L	[mm]	100
Wire	AWG	n/a

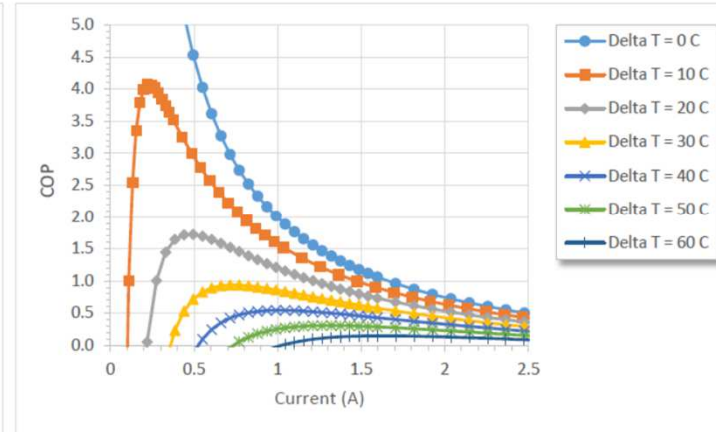
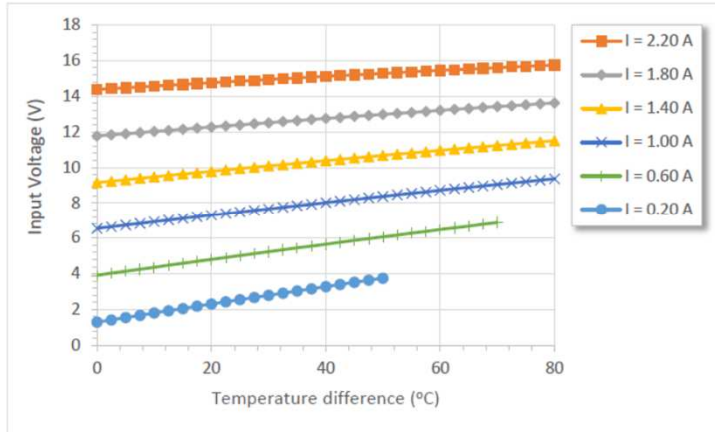
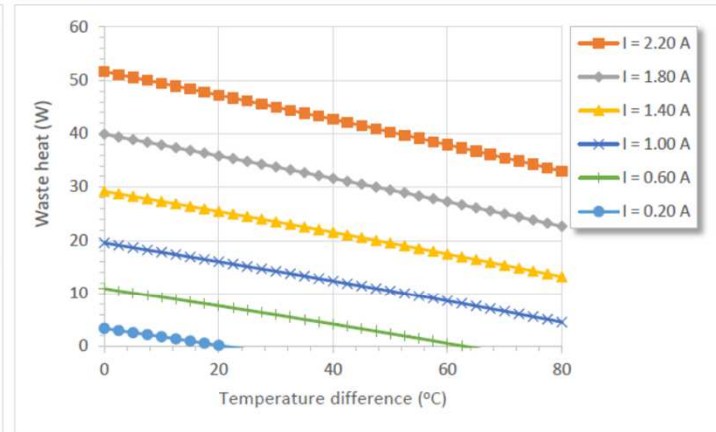
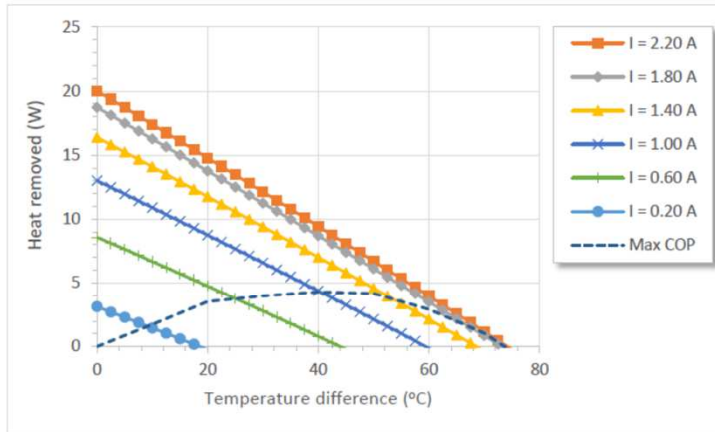
- (At hot side temperature $T_h = 25^\circ\text{C} / 298\text{K}$, under dry N_2)
- $P_c \text{ max}$ = Cooling power at $\Delta T = 0$ and $I = I_{max}$
- ΔT_{max} = Temperature difference at $I = I_{max}$ and $P_c = 0$
- Max hot side temperature $T_h = 90^\circ\text{C}$ for best long term performance
- Max mounting pressure: 1.5MPa
- Wires: UL-style 1569, 105°C (Unstripped)

- Input (Black) + Input (Red)



THERMOELECTRIC REFRIGERATION

Data sheet - At hot side temperature 25°C

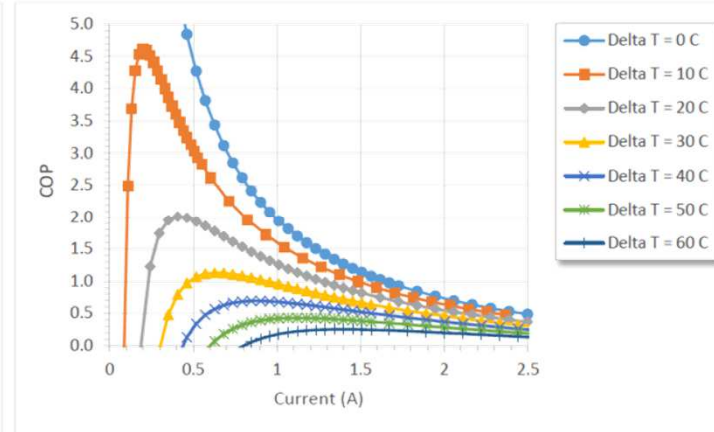
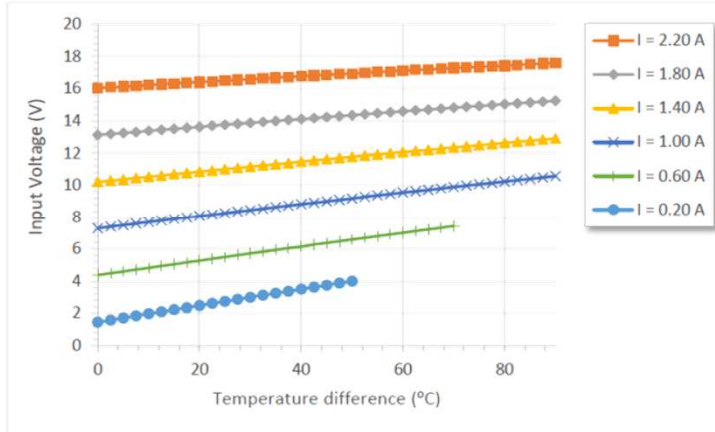
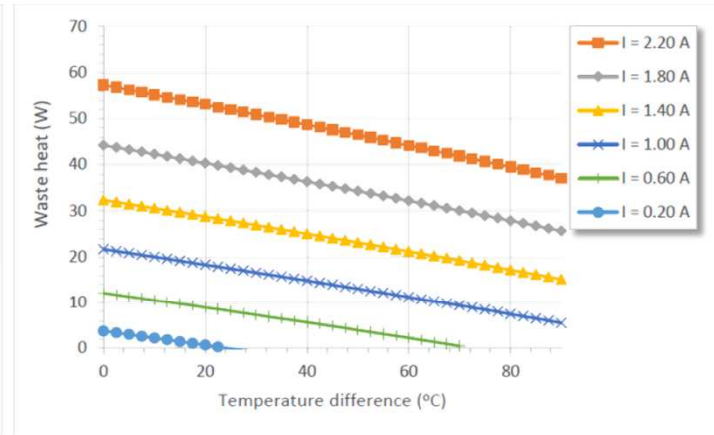
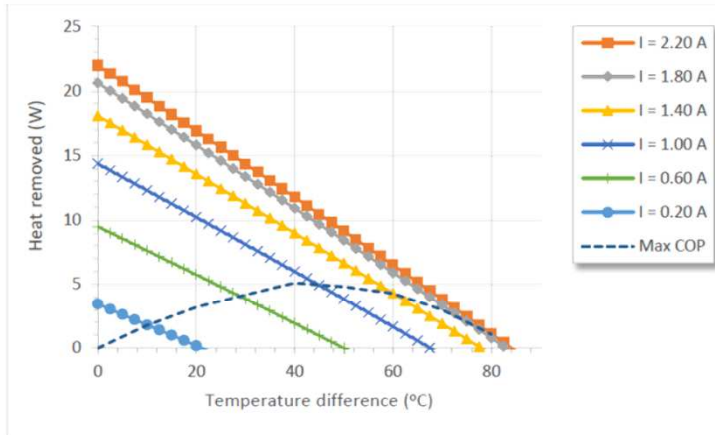


*Note - Waste heat = Heat out of hot side



THERMOELECTRIC REFRIGERATION

Data sheet - At hot side temperature 50°C



*Note - Waste heat = Heat out of hot side



THERMOELECTRIC REFRIGERATION

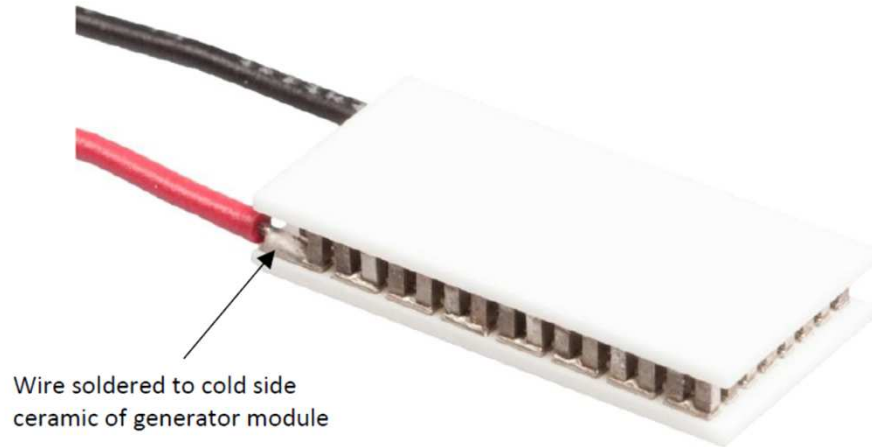


Figure 2. Image of generator module showing how the wires are soldered to the cold side.

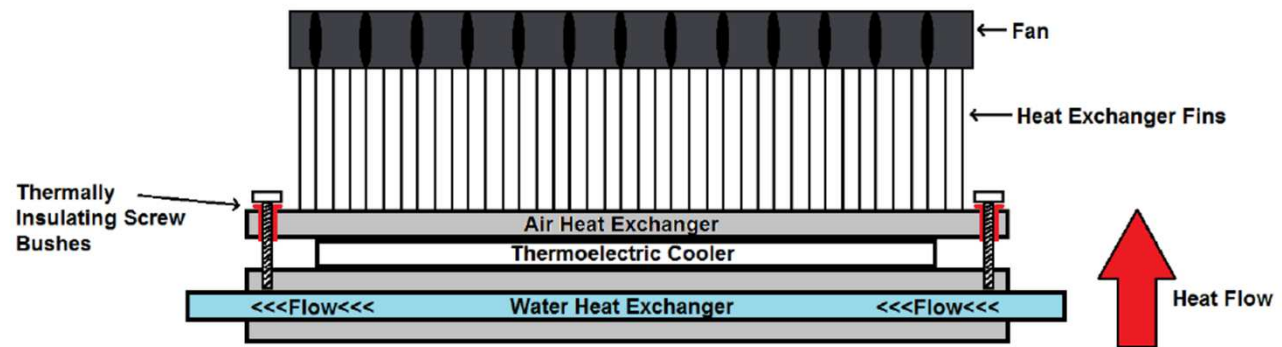


Figure 4. Example of a liquid to air thermoelectric cooler system.

PHASE CHANGE



Sensible Heat + Latent Heat
 $m \cdot c \cdot \Delta T + m \cdot h_{sl}$



Your energy cost is electricity to extract this heat from the PCM:

$$\frac{m \cdot c \cdot \Delta T + m \cdot h_{sl}}{\eta}$$

T_{PC} is on demand

η



PHASE CHANGE



$$T_{PC} = 0^{\circ}C$$



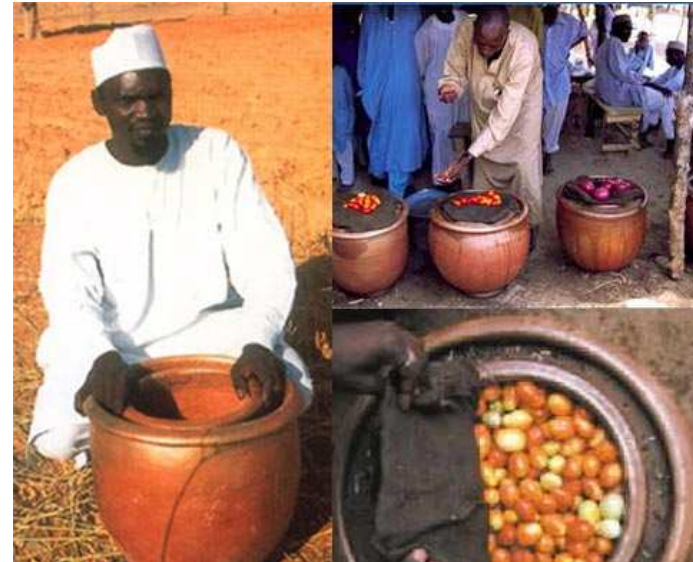
Sensible Heat + Latent Heat

$$m \cdot c_{H_2O} \cdot \Delta T + m \cdot h_{sl}^{H_2O}$$

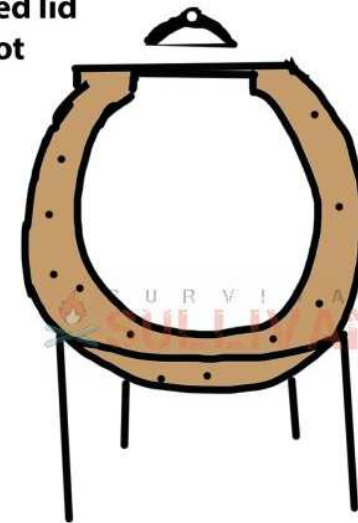
Your energy cost is electricity for freezing the water:

$$\frac{m \cdot c_{H_2O} \cdot \Delta T + m \cdot h_{sl}^{H_2O}}{\eta}$$

PHASE CHANGE



Tightly fitted lid
for inner pot



Wet sand

Stand will help
with the
cooling

This type of food storage can last for 20 days

PHASE CHANGE

In harsh dry climates, food preservation plays a vital role in maximizing both economic and nutritional yield from the rare opportunity of a good harvest. The dry heat significantly reduces the life of produce and as a result there is a high level of wasted crop^[2].

The following shelf-life comparison has been adapted from a case study performed by the Practical Action Organization and can be directly accessed [here](#).

Table 1: Shelf of common produce with Zeer pot refrigerator^[3]

Produce	Shelf-Life without Zeer	Shelf-Life with Zeer
Tomatoes	2 days	20 days
Guavas	2 days	20 days
Okra	4 days	17 days
Carrots	4 days	20 days
Arugula	1 day	5 days

The impact of the pot-in-pot refrigerator is immediately realized as the shelf life for most produce is extended by 5 to 10 times. This means that farmers are not only able sell their produce beyond the initial days following a harvest, but will also be able to safely consume the unsold goods because of their extended shelf life.

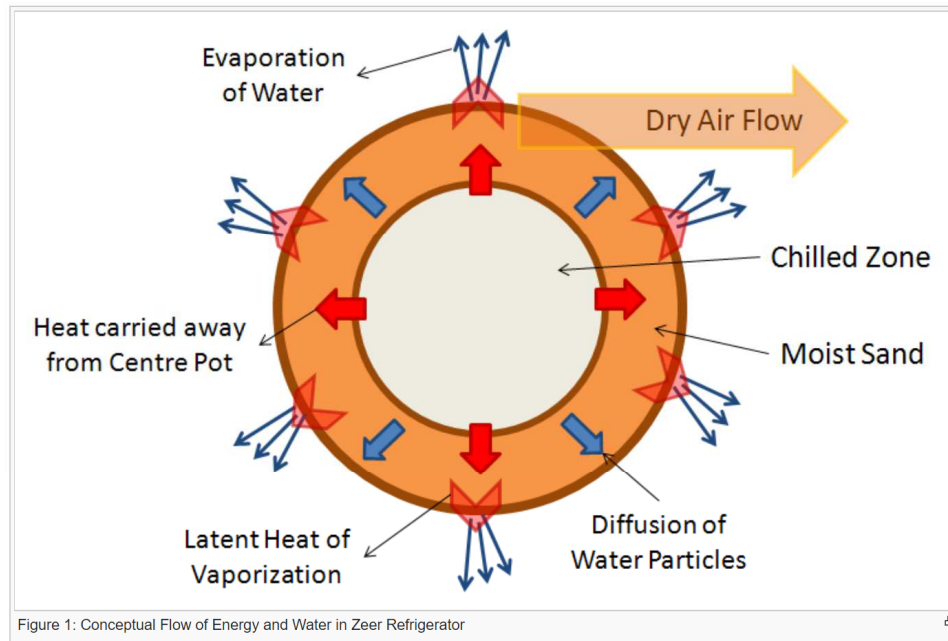
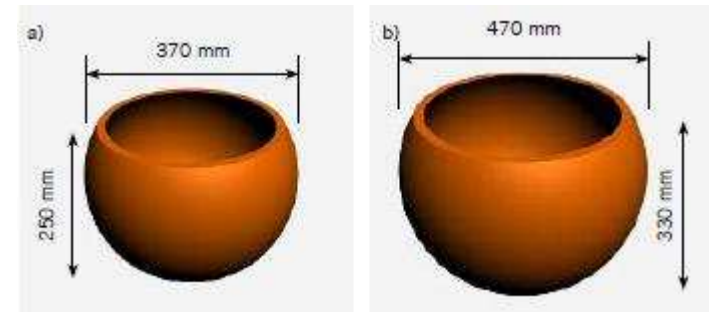
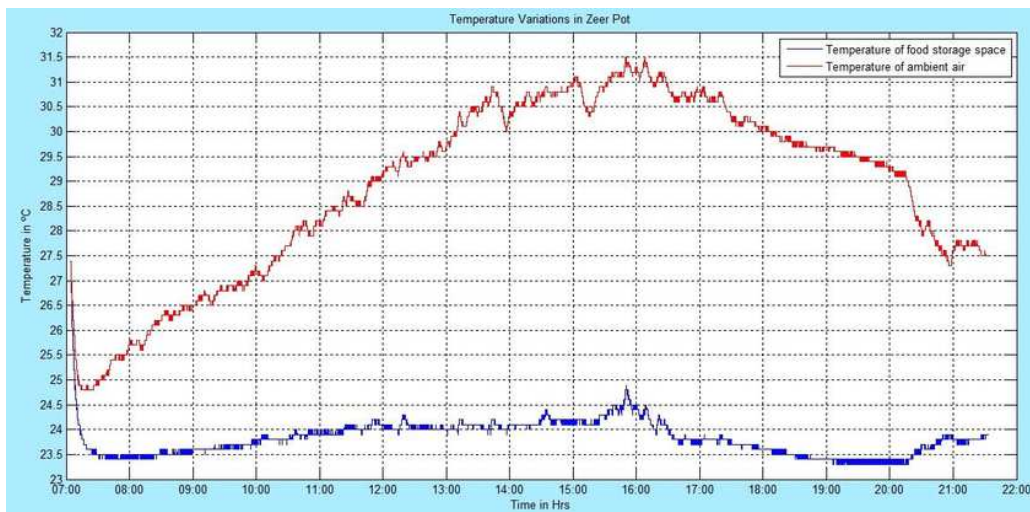


Figure 1: Conceptual Flow of Energy and Water in Zeer Refrigerator

[http://www.appropedia.org/Zeer_pot_refrigeration_\(design\)](http://www.appropedia.org/Zeer_pot_refrigeration_(design))



https://www.researchgate.net/publication/311515444_Experimental_Comparative_Analysis_of_Clay_Pot_Refrigeration_Using_Two_Different_Designs_of_Pots

PHASE CHANGE



HOW IT WORKS

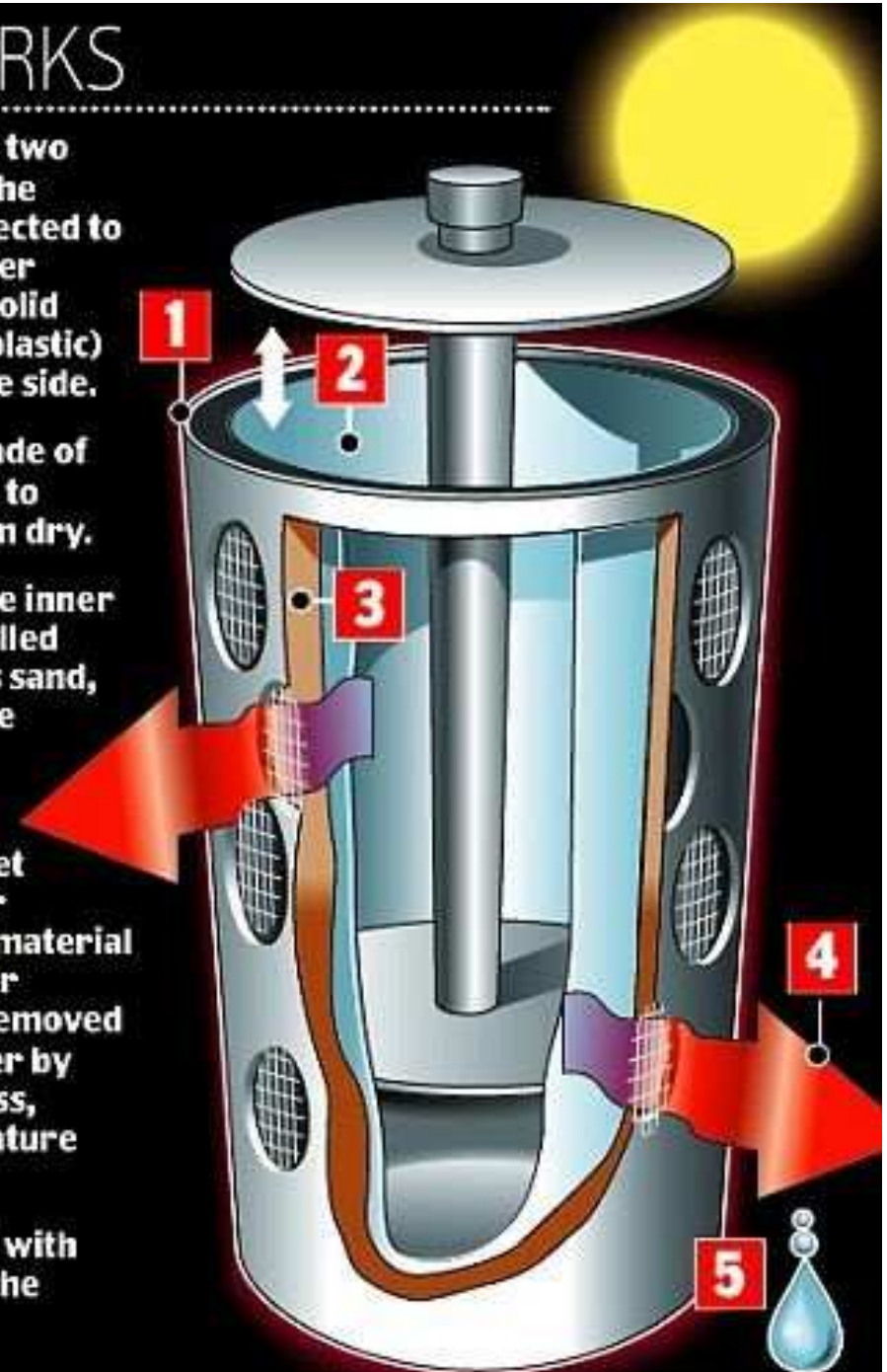
1. Fridge is made up of two cylinders - one inside the other - and is not connected to any power source. Outer cylinder made of any solid material (eg wood or plastic) with holes drilled in the side.

2. Inner cylinder is made of metal and has no holes to ensure contents remain dry.

3. The gap between the inner and outer cylinder is filled with a material such as sand, wool or soil, that can be soaked with water.

4. In hot weather the sun's rays heats this wet material and the water evaporates off. As the material is held against the inner cylinder wall, heat is removed from the inner chamber by the evaporation process, keeping it at a temperature of a cool 6c.

5. Resoaking material with fresh water will keep the 'fridge' working.



Graphic by John Lawson

PHASE CHANGE

MACNA

ERGONOMIC
Contoured to fit the body perfectly

LIGHTWEIGHT
Lightweight for your entire ride

TIME OF USE
Use in the morning and in the afternoon

DRY
Keeps you dry and comfortable for the entire ride

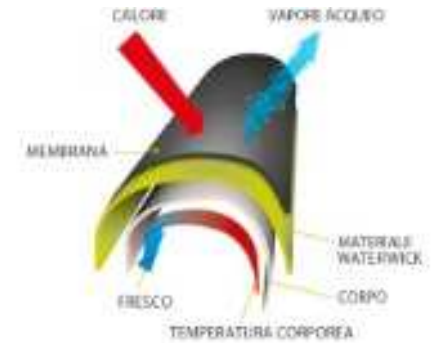
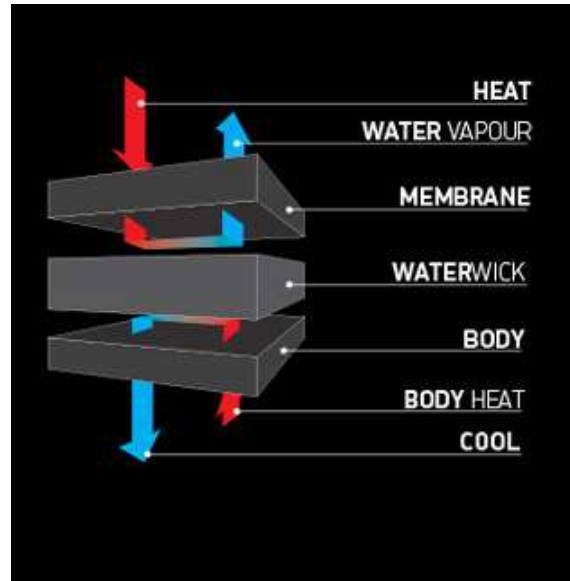
HYGIENIC
Keeps you clean and fresh

THE NEXT STEP TO
STAY COOL

THE PRINCIPLE
The vest's microcapsules absorb and store the water inside the vest. As you ride, the heat from your body is cooled down in the vest before you become sweaty. Simply fill the vest with water, simply activated by adding 500ml of tap water and you are ready to stay cool for up to three days.

MACNA DRY COOLING VEST

THAT'S
 WE ONLY
 RIDING
 GEAR!



EVAPORATIVE COOLER

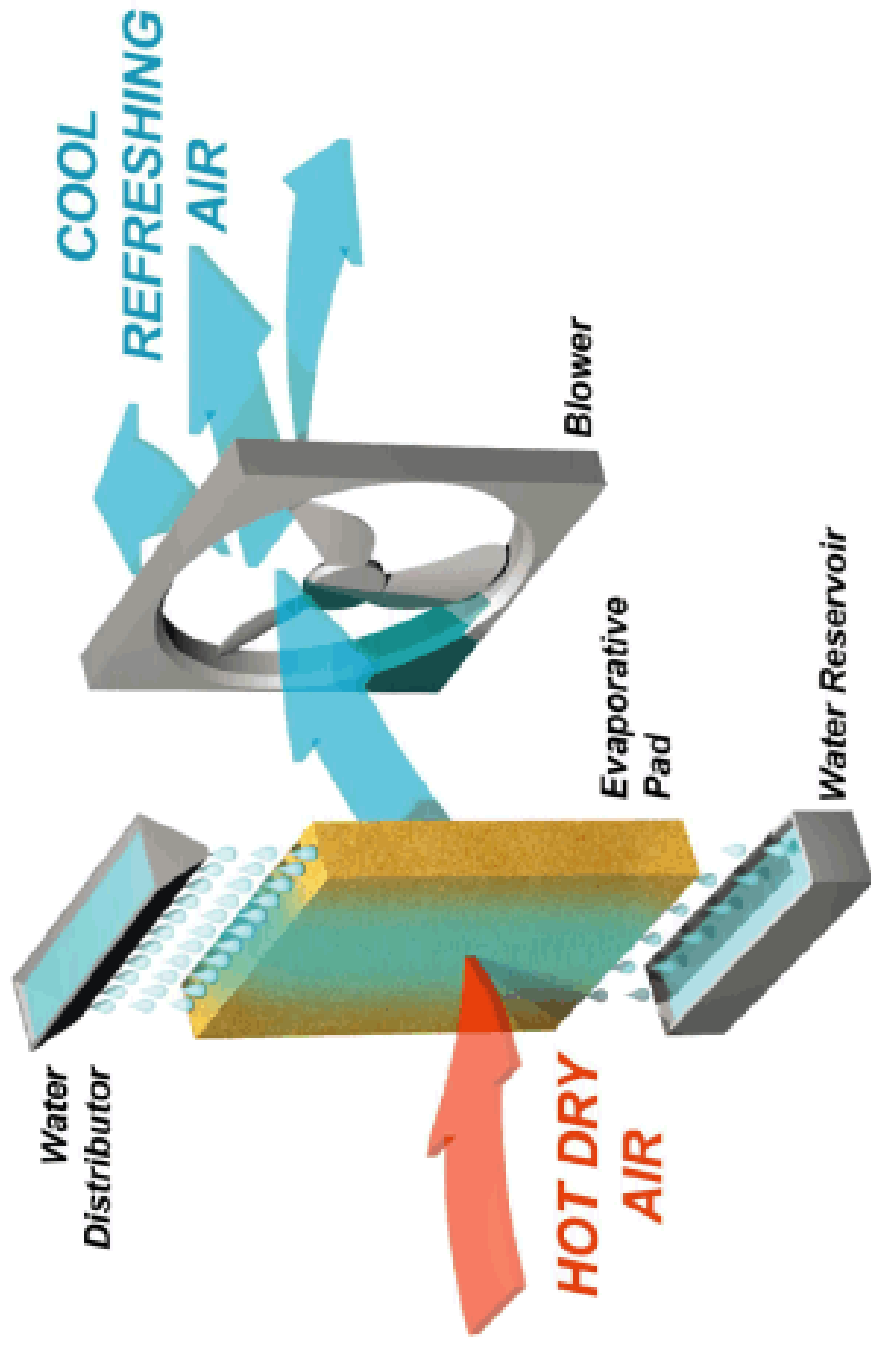
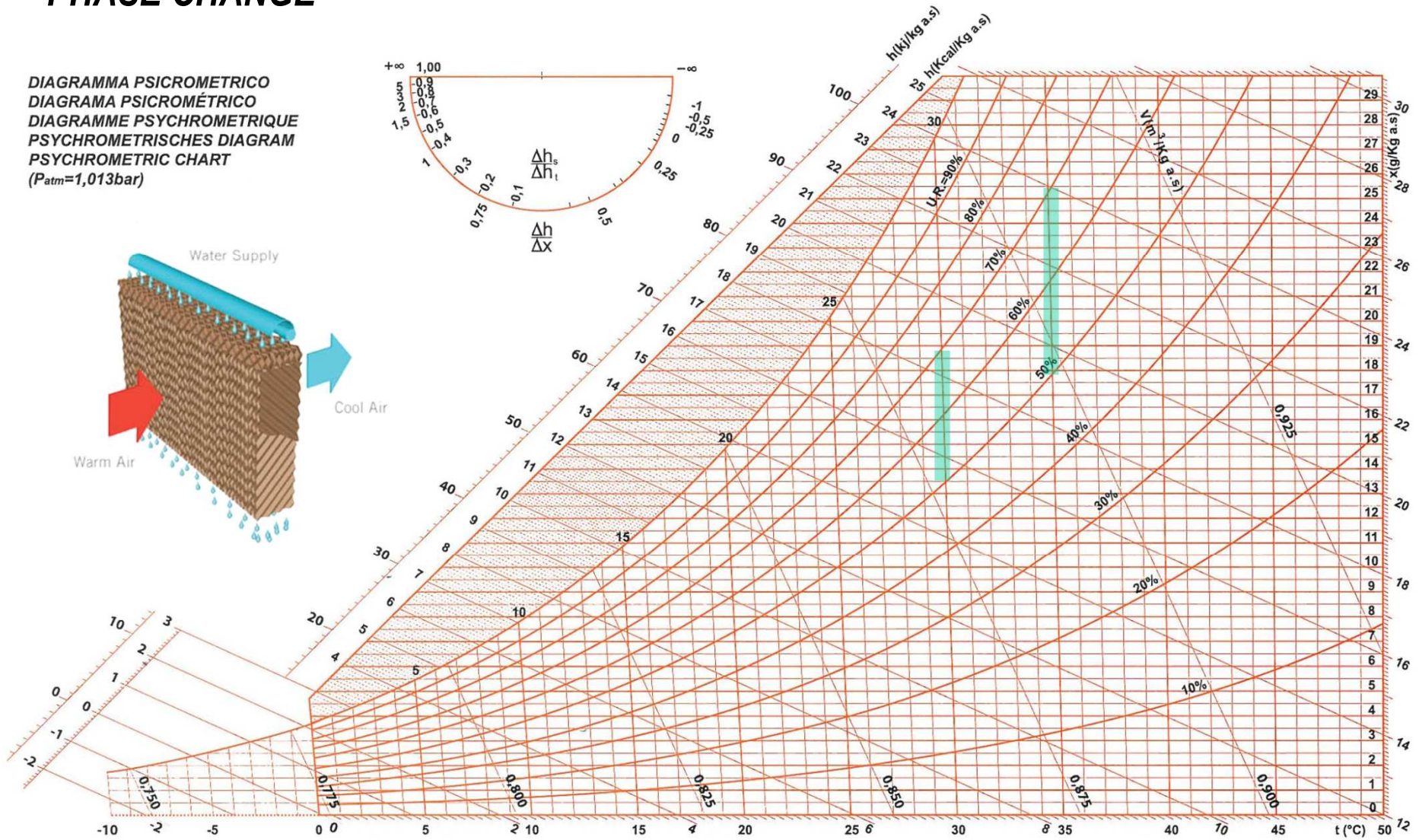
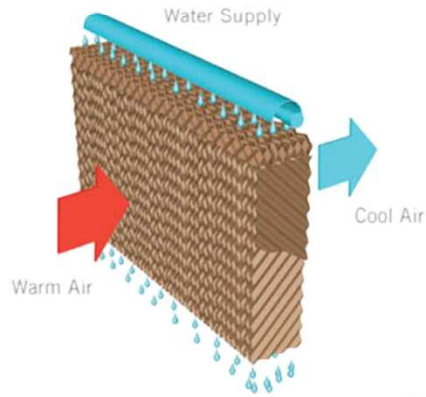


Figure 4: Evaporative cooler working.

PHASE CHANGE

DIAGRAMMA PSICROMETRICO
 DIAGRAMA PSICROMÉTRICO
 DIAGRAMME PSYCHROMETRIQUE
 PSYCHROMETRISCHES DIAGRAM
 PSYCHROMETRIC CHART
 ($P_{atm}=1,013bar$)



*cooking an
egg*



6-122 An egg is dropped into boiling water. The amount of heat transfer to the egg by the time it is cooked and the amount of entropy generation associated with this heat transfer process are to be determined.

Assumptions 1 The egg is spherical in shape with a radius of $r_0 = 2.75$ cm. 2 The thermal properties of the egg are constant. 3 Energy absorption or release associated with any chemical and/or phase changes within the egg is negligible. 4 There are no changes in kinetic and potential energies.

Properties The density and specific heat of the egg are given to be $\rho = 1020$ kg/m³ and $C_p = 3.32$ kJ/kg·°C.

Analysis We take the egg as the system. This is a closed system since no mass enters or leaves the egg. The energy balance for this closed system can be expressed as

$$\underbrace{E_{in} - E_{out}}_{\substack{\text{Net energy transfer} \\ \text{by heat, work, and mass}}} = \underbrace{\Delta E_{\text{system}}}_{\substack{\text{Change in internal, kinetic,} \\ \text{potential, etc. energies}}}$$

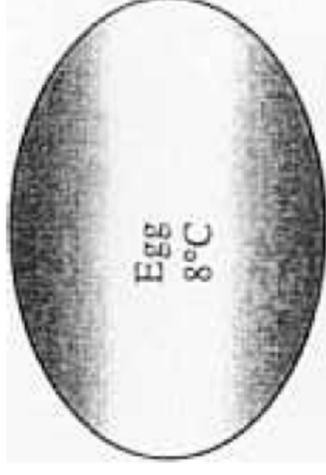
$$Q_{in} = \Delta U_{egg} = m(u_2 - u_1) = mC(T_2 - T_1)$$

Then the mass of the egg and the amount of heat transfer become

$$m = \rho V = \rho \frac{\pi D^3}{6} = (1020 \text{ kg/m}^3) \frac{\pi (0.055 \text{ m})^3}{6} = 0.0889 \text{ kg}$$

$$Q_{in} = mC_p(T_2 - T_1) = (0.0889 \text{ kg})(3.32 \text{ kJ/kg}\cdot\text{°C})(70 - 8)\text{°C} = 18.3 \text{ kJ}$$

Boiling
Water



Heat power of a burner: 1000W

If operating for 4'30" (*time for cooking a perfect soft-boiled egg*), we spend 270kJ of primary energy (=1000W x 270"), even if the theoretical would have been 18kJ.

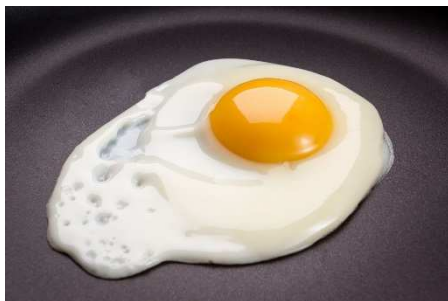
But, water should be boiling before.

Neglecting the pot mass, if you fill the pot with tap water (20°C, 1kg) and spend 10' for let boiling, your further primary energy is 600kJ (=1000W x 600"), even if the theoretical heat would have been 336kJ (=1kg x 4,2kJ/kg*K x [100°-20°]).

Therefore, your efficiencies are:

- to let the water boiling, 56% (=336/600)
 - to cooking, 7% (=18/270)
- and, on average, 41% (=7% x 270/870 + 56% x 600/870)

How could you make it more sustainable?



?

